

Methoden zur Analyse, Bewertung und Modifikation digitaler Höheninformationen für Luftfahrtanwendungen

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Gunther HEIDELMEYER

aus Rüsselsheim

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. U. KLINGAUF

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. M. BECKER

Tag der Einreichung: 22.01.2008

Tag der mündlichen Prüfung: 09.04.2008

Darmstadt 2008

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Klingauf, dem Leiter des Fachgebietes, für die Ermöglichung dieser Arbeit, insbesondere für die stetige Unterstützung, die er mir während der Erstellung zuteil werden ließ. Für die freundliche Übernahme des Koreferates möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Becker vom Institut für Physikalische Geodäsie herzlich bedanken. Des weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. em. Dr.-Ing. W. Kubbat bedanken, der mich am Institut aufgenommen und somit den Beginn meiner Forschungstätigkeiten ermöglicht hat.

All meinen Kollegen am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, insbesondere der Forschungsgruppe Luftfahrt Datenbanken, möchte ich für die gemeinsame Zeit Dank sagen. Eine besondere Erwähnung gebührt Britta Eilmus, Andreas Sindlinger sowie Axel Friedrich, die durch ihre stetige Unterstützung, Diskussion und Motivation maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

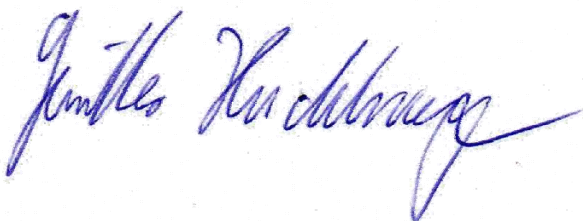
Ebenfalls möchte ich meinem Diplomanden Andreas Paul sowie meiner studentischen Hilfskraft Herve Simo Thom danken, die mit ihren Arbeiten zu den Ergebnissen dieser Dissertation beigetragen haben.

Weiterhin möchte ich mich bei der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG), namentlich Herrn Carsten Dorn sowie der Bayerischen Vermessungsverwaltung (BVV) bedanken, ohne deren Unterstützung die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Meiner Familie, ausdrücklich meiner Frau Kristin sowie meinen Eltern, möchte ich für die stetige Unterstützung und ihr Vertrauen danken, das sie mir während meines Studiums und der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter entgegen gebracht haben. Mein abschließender Dank gilt „OK“ für seine gewissenhafte Korrektur der Arbeit sowie der Übernahme der angefallenen Kosten für die Drucklegung.

Ich versichere an Eides statt, daß ich diese Arbeit mit Ausnahme der ausdrücklich erwähnten Hilfen selbständig durchgeführt habe.

Darmstadt, im Januar 2008

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Kubbat', with a stylized, flowing script.

Für Ida

Übersicht

In der Luftfahrt gewinnen digitale Höhenmodelle an immer größerer Bedeutung. Inzwischen existiert eine Vielzahl von Luftfahrtanwendungen, die auf Geländeinformationen zurückgreifen. Das Spektrum solcher Applikationen reicht von bodenseitigen Systemen zur Flugplanung und -überwachung bis hin zu flugzeuggetragenen Systemen, die unter anderem das Situationsbewußtsein der Cockpitbesatzung erhöhen sollen. Um eine Vereinheitlichung der Qualität sowie der Formate und Inhalte der Datensätze sicherzustellen, wurden für die zivile Luftfahrt durch die ICAO wie auch die RTCA/EUROCAE Anforderungen an digitale Höheninformationen spezifiziert, die einen sicheren Betrieb des Flugzeuges auch während der bodennahen Flugphasen gewährleisten sollen.

Allerdings ist die Verfügbarkeit adäquater Datensätze begrenzt. Geländeinformationen, die heute die geforderten Genauigkeiten anbieten können, bedienen sich Verfahren der flugzeuggetragenen Laser bzw. Radarvermessung, die sehr arbeitsaufwendig und damit kostenintensiv sind. Somit werden entsprechende Verfahren zumeist für die Vermessung begrenzter Flächen verwendet. Dies hat zur Folge, daß selbst in Industrieländern keine landesweite Abdeckung gewährleistet ist, obwohl entsprechende Geländedaten hoher Genauigkeit und Integrität mit praktisch globaler Flächendeckung benötigt werden.

Um dieser Nachfrage gerecht zu werden, werden in dieser Arbeit Methoden aufgezeigt, die eine Bewertung und Bereitstellung von Geländedaten sicherstellen, die den Anforderungen der ICAO und RTCA/EUROCAE genügen. Hierzu werden primär keine kosten- und zeitintensiven Sonderanfertigungen betrachtet, sondern Datenprodukte kostengünstiger Systeme mit globaler Abdeckung so modifiziert, daß sie auch zum Einsatz bei sicherheitskritischen Luftfahrtanwendungen geeignet sind.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden existierende Geländedatensätze verschiedener Quellen betrachtet, wobei die während der SRTM Mission aus dem Weltall aufgezeichneten Radarhöhendaten von besonderem Interesse sind, da diese weltweit verfügbare Datensätze gleicher Eigenschaften ermöglichen. Diesen Datensätzen werden mittels flugzeuggetragenen Laserscanningsystemen gewonnene Höhenmodelle gegenübergestellt. Bei allen genannten Technologien handelt es sich um aktive Systeme, die eine künstliche Strahlung erzeugen, welche von der Erdoberfläche reflektiert und von einem Empfänger aufgezeichnet wird. Die Qualität der zurückgestreuten Signale wird von den Eigenschaften der vermessenen Oberflächen beeinflusst und hat somit einen unmittelbaren Einfluß auf die Qualität der aufgezeichneten Informationen.

Um eine tiefergehende Bewertung der Qualität der untersuchten Geländedaten vornehmen zu können, werden die Höheninformationen Kontrollpunkten wie auch gesamten Datensätzen gegenübergestellt. Die auftretenden Fehler werden quantifiziert und die maßgeblichen Einflußfaktoren ermittelt. Basierend auf diesen Ergebnissen können entsprechende Fehlerschranken abgeleitet werden. Liegt der erkannte Fehler über den von der ICAO und RTCA/EUROCAE geforderten Genauigkeiten, werden, basierend auf den ermittelten Fehlerschranken, Sicherheitsmargen, sogenannte „Safety Buffer“ definiert und auf das Höhenmodell addiert. Diese Modifikation der Höhenmodelle erfolgt zum einen durch pauschale Puffer. Zum anderen werden partielle Puffer verwendet, welche den Einfluß von Oberflächenbedeckung, Geländesteigung wie auch der Intensität des Radarechos berücksichtigen. Die abschließende Verifikation der modifizierten Datensätze zeigt, daß eine Anpassung der Höhendaten hinsichtlich eines Erreichens der gewünschten Genauigkeit möglich ist. Allerdings ist eine weitergehende Angleichung des verwendeten Verfahrens an die Charakteristik der untersuchten Datensätze notwendig, um das Einhalten der angestrebten Fehlerschranken unter allen Umständen sicherzustellen und somit eine sichere Nutzung für Luftfahrtanwendungen zu gewährleisten.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abkürzungen | v |
| 1 Einführung | 1 |
| 1.1 Motivation..... | 1 |
| 1.2 Eigenschaften verschiedener Missionstypen in der Luftfahrt | 2 |
| 1.2.1 Fliegen im kontrollierten Luftraum (IFR)..... | 2 |
| 1.2.2 Tiefflug und Geländefolgeflug..... | 4 |
| 1.2.3 Search and Rescue Missionen (SAR) | 6 |
| 1.2.4 Diskussion | 7 |
| 1.3 Struktur der vorliegenden Arbeit..... | 7 |
| 2 Digitale Höhenmodelle | 9 |
| 2.1 Darstellungsweisen eines DHM..... | 9 |
| 2.1.1 Digitale Geländemodelle (DGM)..... | 10 |
| 2.1.2 Digitale Oberflächenmodelle (DOM) | 10 |
| 2.1.3 Digitales Höhenmodell als reflektierte Oberfläche..... | 11 |
| 2.2 Generierungsmethoden..... | 12 |
| 2.2.1 Erfassung über Luft-/ Satellitenbilder (Stereo-Photogrammetrie)..... | 12 |
| 2.2.2 Erfassung über Radarsysteme | 21 |
| 2.2.3 Erfassung mit Laserscanning (LIDAR) | 28 |
| 2.2.4 Fehlertypen in Geländemodellen | 30 |
| 2.3 Organisationsformen von digitalen Höhenmodellen | 31 |
| 2.3.1 Reguläre Gitter | 31 |
| 2.3.2 Irreguläre Gitter (Dreiecksnetze) | 33 |
| 2.3.3 Höhenlinien | 34 |
| 2.4 Erdmodelle und Bezugssysteme..... | 35 |
| 2.4.1 Horizontale Bezugssysteme | 36 |
| 2.4.2 Vertikale Bezugssysteme | 37 |
| 3 Anwendungsgebiete von Geländedaten in der Luftfahrt | 39 |
| 3.1 Internationale Standards..... | 39 |
| 3.1.1 User Requirements for Terrain and Obstacle Data (RTCA/DO-276A)..... | 40 |
| 3.1.2 ICAO Annex 15 - Aeronautical Information Services..... | 47 |
| 3.1.3 Standards for Processing Aeronautical Data (RTCA/DO-200A) | 48 |
| 3.1.4 Diskussion | 48 |
| 3.2 Geländewarnsysteme (TAWS)..... | 50 |
| 3.2.1 T ² CAS | 51 |
| 3.2.2 EGPWS | 52 |
| 3.3 Synthetische Sichtsysteme (SVS) | 52 |
| 3.4 Luftfahrtkarten | 54 |
| 3.5 Geländedaten in der Verfahrensplanung..... | 55 |
| 4 Konzeption zur Qualitätssteigerung von Geländedaten..... | 57 |
| 4.1 Parameter zur Bewertung digitaler Höhenmodelle | 58 |
| 4.1.1 Qualität..... | 58 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.1.2 | Integrität | 58 |
| 4.1.3 | Genauigkeit | 59 |
| 4.1.4 | Mittlere Abweichung | 60 |
| 4.1.5 | Standardabweichung | 60 |
| 4.2 | Erstellung eines „Safety Buffers“ | 60 |
| 4.2.1 | Abgrenzung der Anwendbarkeit | 61 |
| 4.2.2 | Szenario zur Verifizierung des Verfahrens | 62 |
| 4.3 | Untersuchte Geländemodelle | 63 |
| 4.3.1 | SRTM SAR-X und SIR-C Geländemodelle | 63 |
| 4.3.2 | Laser-Scanning Höhenmodelle | 65 |
| 4.3.3 | Photogrammetrisches Referenzhöhenmodell | 67 |
| 4.3.4 | DGM5 Höhenmodelle | 67 |
| 4.4 | Untersuchungsgebiete | 68 |
| 4.4.1 | Bereich Michelstadt/Odenwald | 68 |
| 4.4.2 | Bereich Pfronten/Ostallgäu | 69 |
| 4.5 | Methoden zur Bewertung von Geländemodellen | 70 |
| 4.5.1 | Verifizierung mit Hilfe von Kontrollpunkten | 70 |
| 4.5.2 | Verifizierung mit Hilfe von Referenzgeländemodellen | 71 |
| 4.6 | Einfluß der Oberflächeneigenschaften | 72 |
| 4.6.1 | Geländerauhigkeit | 72 |
| 4.6.2 | Oberflächenbedeckung | 73 |
| 4.6.3 | Reflektionsintensität | 75 |
| 5 | Realisierung | 79 |
| 5.1 | Anpassung der Formate und Verifizierung der Referenzdaten | 79 |
| 5.1.1 | Angleichung der Bezugssysteme | 79 |
| 5.1.2 | Verifizierung der Referenzgeländemodelle | 80 |
| 5.2 | Verifizierung der zu untersuchenden Geländemodelle | 84 |
| 5.2.1 | Bestimmung der Qualitätsparameter mit Hilfe von Kontrollpunkten | 85 |
| 5.2.2 | Verifizierung mit Hilfe von Referenzgeländemodellen | 88 |
| 5.2.3 | Analyse des Einflusses der Oberflächenbedeckung | 95 |
| 5.2.4 | Analyse des Einflusses der Geländeneigung (-rauhigkeit) | 101 |
| 5.2.5 | Analyse des Einflusses der Reflektionsintensität | 104 |
| 5.3 | Definition und Addition eines „Safety Buffers“ | 108 |
| 5.3.1 | Addition eines pauschalen Puffers | 109 |
| 5.3.2 | Addition des partiellen Puffers der topographischen Analyse | 111 |
| 5.3.3 | Addition des partiellen Puffers der Geländeneigungsanalyse | 115 |
| 5.3.4 | Addition des partiellen Puffers der Reflektionsintensitätsanalyse | 122 |
| 6 | Bewertung der Ergebnisse | 125 |
| 6.1 | Bewertung der untersuchten Datensätze | 125 |
| 6.1.1 | Bewertung der Referenzdaten | 125 |
| 6.1.2 | Bewertung der LIDAR Höhenmodelle | 128 |
| 6.1.3 | Bewertung der SRTM X-Band Höhenmodelle | 129 |
| 6.1.4 | Bewertung der SRTM C-Band Höhenmodelle | 131 |
| 6.2 | Bewertung der Verfahrensweise | 132 |

| | |
|---|------------|
| 7 Zusammenfassung und Ausblick | 135 |
| Quellenverzeichnis | 139 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 145 |
| Tabellenverzeichnis..... | 147 |

Abkürzungen

| | |
|---------|---|
| ACAS | Airborne Collision Avoidance System |
| AIP | Aeronautical Information Publication |
| AIRAC | Aeronautical Information Regulation and Control |
| ALS | Airborne Laser Scanner |
| AMDB | Aerodrome Mapping Database |
| ARP | Aerodrome Reference Point |
| A-SMGCS | Advanced Surface Movement Guidance and Control System |
| ATKIS | Amtliches Topographisch-Kartographische Informationssystem |
| BMVBS | Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung |
| CAD | Computer Aided Design |
| CEP | Circular Error Probability |
| CFIT | Controlled Flight Into Terrain |
| CPA | Collision Prediction and Alerting |
| DEM | Digital Elevation Model |
| DGM | Digitales Geländemodell |
| DGPS | Differential GPS |
| DH | Decision Height |
| DHM | Digitales Höhenmodell |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e.V. |
| DLM | Digitales Landschaftmodell |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt |
| DOM | Digitales Oberflächenmodell |
| DSM | Digital Surface Model |
| DTED | Digital Terrain Elevation Data |
| DTM | Digital Terrain Model |
| ECOSOC | Economic and Social Council |
| EGM96 | Earth Geopotential Model 1996 |
| EGPWS | Enhanced Ground Proximity Warning System |
| ESRI | Environmental Systems Research Institute |
| EUROCAE | European Organisation for Civil Aviation Equipment |
| FAA | Federal Aviation Administration |
| FMS | Flight Management System |
| FSR | Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik (TUD) |
| GCAM | Ground Collision Avoidance Module |
| GCAS | Ground Collision Avoidance System |
| GIS | Geographisches Informationssystem |
| GPS | Global Positioning System |
| GPWS | Ground Proximity Warning System |
| HLVA | Hessisches Landesvermessungsamt |
| HVBG | Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation |
| ICAO | International Civil Aviation Organization |
| IERS | International Earth Rotation and Reference Systems Service |

| | |
|--------------------|---|
| IFR | Instrument Flight Rules (Instrumentenflugregeln) |
| IFSAR | Interferometric Synthetic Aperture Radar |
| ILS | Instrument Landing System |
| INS | Inertiales Navigationssystem |
| ISO | International Organization for Standardization |
| ITRF | International Terrestrial Reference Frame |
| ITRS | International Terrestrial Reference System |
| LEP | Linear Error Probability |
| LIDAR | Light Detection and Ranging |
| MSAW | Minimum Safe Altitude Warning |
| MSL | Mean Sea Level |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| ND | Navigation Display |
| NDB | Non Directional Beacon |
| NGA | National Geospatial-Intelligence Agency |
| NIMA | National Imagery and Mapping Agency |
| PFD | Primary Flight Display |
| RADAR | Radio Detection and Ranging |
| RMS | Root Mean Square |
| RNAV | Area Navigation |
| RNP | Required Navigation Performance |
| RTCA | Radio Technical Commission for Aeronautics |
| RVR | Runway Visibility Range |
| SAR | Synthetic Aperture Radar |
| SAR | Search and Rescue |
| SARP | Standards and Recommended Practices |
| SIR | Spaceborne Imaging Radar |
| SRTM | Shuttle Radar Topographic Mission |
| SVS | Synthetic Vision System |
| T ² CAS | Terrain and Traffic Collision Avoidance System |
| TAWS | Terrain Awareness and Warning System |
| TCAS | Traffic Collision Avoidance System |
| TIN | Triangulated Irregular Network |
| TMA | Terminal Manouvering Area |
| TSO | Technical Standard Order |
| TUD | Technische Universität Darmstadt |
| USGS | United States Geological Survey |
| VFR | Visual Flight Rules (Sichtflugregeln) |
| VOR | Very High Frequency Omnidirectional Radio Range (Drehfunkfeuer) |
| WGS84 | World Geodetic System 84 |

1 Einführung

1.1 Motivation

In der Luftfahrt gewinnen Geodaten an immer größerer Bedeutung. Unter Geodaten versteht man digitale räumliche Informationen, denen, eingebettet in ein Koordinatensystem mit einem dazugehörigen Bezugsmodell der Erdoberfläche, eine bestimmte Lage im Raum zugewiesen werden kann. Von besonderer Bedeutung für die Luftfahrt sind hierbei Navigations-, Gelände-, Flughafen- und Hindernisdaten. Aufgrund ihrer operationellen Bedeutung und somit sicherheitsrelevanten Auswirkung, ist es allerdings notwendig, eine gleichbleibend hohe Genauigkeit, Vollständigkeit und Integrität zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurden für die zivile Luftfahrt durch die ICAO, wie auch die RTCA und EUROCAE Anforderungen definiert, die einen sicheren Flugbetrieb während aller Flugphasen eines Passagierflugzeuges garantieren sollen. Dabei befinden sich kommerziell betriebene Verkehrsflugzeuge üblicherweise vom Start bis zur Landung stets in einem durch die Flugsicherung überwachten Luftraum, der ein von Hindernissen und Fremdverkehr freies Operieren gewährleisten soll.

Kritischer hingegen gestaltet sich ein Fliegen außerhalb der kontrollierten Lufträume. Solche Flugbewegungen werden von Luftfahrzeugen durchgeführt, die in unmittelbarer Bodennähe operieren. Hierbei handelt es sich in der Regel um Hubschrauber, Militärflugzeuge, aber auch unbemannte Flugobjekte, wobei letztere zukünftig an Bedeutung gewinnen werden. Um eine Gefährdung oder sogar einen Verlust des Flugzeuges zu verhindern, wurde eine Vielzahl von Systemen entwickelt, die ein sicheres und effektiveres Planen der Flugroute ermöglichen, aber auch das Situationsbewußtsein der Cockpitbesatzung erhöhen sollen. Grundlage hierzu stellt die Verfügbarkeit von digitalen Höheninformationen hoher Genauigkeit und Integrität dar. Idealerweise geben diese Höheninformationen in der Luftfahrt die Erdoberfläche samt seiner Bedeckung als „Digitales Oberflächenmodell“ (DOM) wieder, da bei einer solchen Darstellungsweise zumindest Hindernisse größerer Ausdehnung wie Wälder und Stadtgebiete enthalten sind.

Auf dem Markt erhältliche globale Geländedatensätze sind allerdings für die Luftfahrt meist nur begrenzt nutzbar und für bodennahe Flugbewegungen weitgehend ungeeignet. Jene Geländeinformationen, die heutzutage die geforderten Genauigkeiten anbieten können, bedienen sich Verfahren der flugzeuggetragenen Laser- bzw. Radarvermessung, die allerdings sehr kostenintensiv sind. Aus diesem Grund werden mit solchen Systemen meist nur begrenzte Flächen vermessen, so daß selbst in Industrieländern nicht einmal eine flächendeckende Abdeckung gewährleistet ist.

Wie aus nationalen und internationalen Forschungsarbeiten am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik (FSR) an der Technischen Universität Darmstadt hervorgeht, besteht eine stetig wachsende Nachfrage an Gelände- und Hindernisdaten hoher Genauigkeit und Integrität mit möglichst globaler Abdeckung, wie sie unter anderem durch die RTCA/EUROCAE und ICAO gefordert werden. Neben der zivilen Luftfahrt sind solche Informationen auch für militärische Operationen wie auch für SAR (Search and Rescue) Missionen in weltweiten Katastrophengebieten von besonderem Interesse.

Um dieser zunehmenden Nachfrage gerecht zu werden, soll in der vorliegenden Arbeit ein Verfahren aufgezeigt werden, welches eine Bereitstellung von Geländedaten sicherstellen kann, die auch den speziellen Anforderungen der Luftfahrt genügen. Hierzu sollen keine kosten- und zeitintensiven Sonderanfertigungen betrachtet werden, sondern Produkte etablierter und kostengünstiger Systeme so modifiziert werden, daß diese auch zum Einsatz in sicherheitskritischen Luftfahrtanwendungen geeignet sind.

Um dies zu erreichen, sollen existierende Geländedatensätze verschiedener Herstellungsweisen analysiert werden, wobei hier die während der SRTM Mission im Jahr 2000

gewonnenen Radarhöhendaten der DLR (X-Band) und NASA (C-Band) von besonderem Interesse sind, da diese Systeme aus dem Weltall betrieben wurden und somit unabhängig von nationalen Interessen weltweite Datensätze gleicher Qualität erzeugen konnten. Daneben sollen Höheninformationen untersucht werden, die mittels Laseraltimetrie generiert wurden. Verfahren des Laserscannings werden flugzeuggestützt betrieben und sind dadurch ungeeignet, weltweite Geländemodelle bereitzustellen. Dennoch erfreut sich diese Technologie zunehmend großer Beliebtheit, da dieses System Daten höchster Auflösung und Genauigkeit liefern kann.

Bei allen oben genannten Technologien handelt es sich um aktive Systeme. Im Gegensatz zu passiven Systemen, wie z.B. der Photographie, erzeugen die aktiven Systeme eine künstliche Strahlung (Mikrowellen bzw. Licht), welche von der Erdoberfläche reflektiert wird. Auf der Basis der Laufzeitmessung kann die Entfernung des bestrahlten Objektes und somit seine Höhe bestimmt werden, sofern die exakte Position des Systemträgers bekannt ist. Allerdings weisen entsprechend aktive Sensoren einen für die Luftfahrt sicherheitskritischen Aspekt auf. Die ausgesendete Strahlung dringt in die Oberfläche ein, was dazu führt, daß die aufgenommenen Höhendaten nicht exakt die Oberfläche der vermessenen Objekte wiedergeben. Weist die bestrahlte Oberfläche jedoch eine signifikante Höhe auf, dringt je nach Art und Dichte der Oberflächenbedeckung, die Strahlung allerdings auch nicht bis zum Boden durch, was zur Folge hat, daß ebenfalls kein digitales Geländemodell (DGM) bereitgestellt werden kann. Das am Ende vorliegende Geländemodell stellt somit die Reflektionshöhe des vermessenen Gebietes dar und nicht die wirkliche Oberfläche (DOM).

Um letztlich eine tiefgreifende Bewertung der Qualität von auf diesem Weg gewonnenen Höhendaten vornehmen zu können, sollen in der vorliegenden Untersuchung die maßgeblichen Einflußfaktoren bestimmt und quantifiziert werden, um schließlich entsprechende Fehlerschranken abzuleiten. Hierzu sollen die Höhenmodelle mit Referenzdaten hoher Genauigkeit und Integrität in zwei Untersuchungsgebieten abgeglichen werden. Als Referenz sollen zum einen Kontrollpunkte, aber auch ganze Geländemodelle herangezogen werden. Sind die Fehlerschranken bekannt, soll abhängig von der jeweils geforderten Genauigkeit eine Sicherheitsmarge, der sogenannte „Safety Buffer“, auf das Höhenmodell gelegt werden, um eine entsprechende Sicherheit beim Überfliegen des realen Geländeabschnittes zu sichern.

1.2 Eigenschaften verschiedener Missionstypen in der Luftfahrt

In der Luftfahrt existiert eine Vielzahl verschiedener Missionstypen. Diese Flugbewegungen erfüllen zum Teil sehr unterschiedliche Aufgaben. Diese reichen von dem Transport von Passagieren und Waren in dem von der Flugsicherung kontrollierten Luftraum bis hin zu bodennahen militärischen Operationen, wie dem Tiefflug bzw. dem „Terrain Following“. Daneben existieren Mischformen der verschiedenen Missionstypen wie sie oftmals beim Einsatz von SAR Helikoptern vorgefunden werden.

Im Folgenden werden einige Arten von Flugmissionen vorgestellt und die unbedingte Notwendigkeit von Geländedaten hoher Genauigkeit und Integrität während einzelner Flugphasen dargestellt. Ebenfalls sollen Gemeinsamkeiten zwischen den einzelnen Einsatzmöglichkeiten identifiziert werden, um eine Vergleichbarkeit der Anforderungen herstellen zu können.

1.2.1 Fliegen im kontrollierten Luftraum (IFR)

Der operative Betrieb eines Flugzeuges im kontrollierten Luftraum zeichnet sich dadurch aus, daß alle Flugphasen durch die Flugsicherung begleitet werden. Ziel ist es, in Regionen von konzentrierten Flugbewegungen, eine Regelung des Flugbetriebes zu erreichen. Auch wenn Flüge nach Sichtflugregeln im kontrollierten Luftraum möglich sind, werden hier die Flugbewegungen betrachtet, die nach den Instrumentenflugregeln durchgeführt werden wie sie bei Linienflugzeugen üblich sind [WAL06].

Besonders kritisch ist hierbei der unmittelbare Nahbereich von Verkehrsflughäfen, in dem das Starten und Landen erfolgt. Ebenfalls kritisch ist die weitere Umgebung der Flughäfen, in deren Umfeld das Einfädeln und Vorordnen der Streckenflüge in den Anflug und umgekehrt das Einordnen der Abflüge in den Streckenverkehr durchgeführt werden [Her75].

Die einzelnen Flugphasen können nach [Wal06] in die in Abbildung 1.1 dargestellten Abschnitte unterteilt werden.

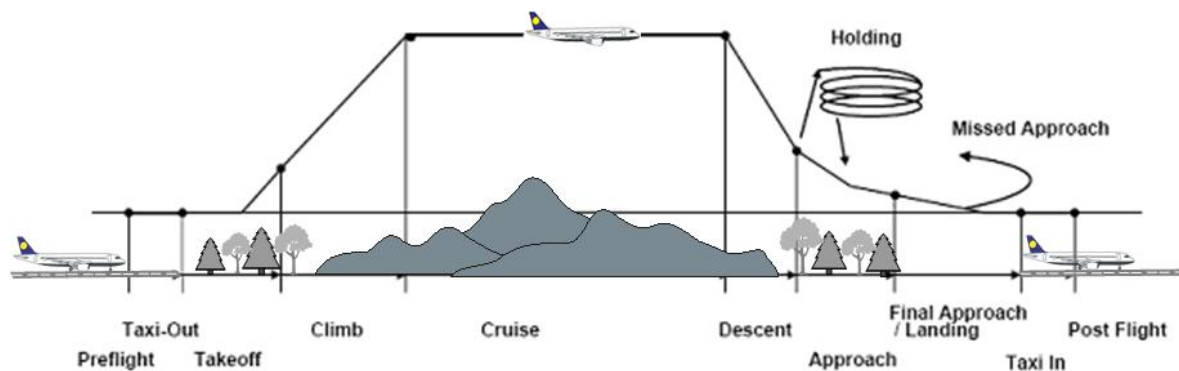


Abbildung 1.1: Flugphasen eines Fluges im kontrollierten Luftraum [nach Wal06]

Auch wenn neue Technologien und Prozeduren, sowohl bei der Flugkoordinierung und Flugplanung am Boden wie auch der eigentlichen Flugdurchführung, im Cockpit eingeführt wurden, kam es in den vergangenen Jahren immer wieder zu fatalen Verlusten in der zivilen Luftfahrt [FSF99].

Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Flugzeug verunfallt ist maßgeblich von der Flugphase abhängig, in der sich ein Flugzeug befindet. Während der Streckenflug die weitaus längste Phase eines zivilen Fluges darstellt, kommt es nach [Boe06] nur zu 6% aller Unfälle. Die mit Abstand kritischste Phase eines Fluges stellt die Landung dar. Hierbei ereignen sich nach [Boe06] 46% aller Unglücke, wobei es nur zu 2% der tödlichen Unfälle kommt. Betrachtet man die in Abbildung 1.2 erhobene Statistik der Unfälle von gewerblich betriebenen Flugzeugen im Zeitraum von 1996 bis 2005, zeigt sich, daß die kritischen Phasen eines Fluges hinsichtlich eines fatalen Unglückes das Erreichen und Verlassen der Reiseflughöhe darstellen.

Insgesamt konnte als Hauptursache für Flugunfälle in der kommerziellen Luftfahrt der sogenannte „Controlled-Flight-Into-Terrain“ (CFIT) identifiziert werden. Fast 25%, und zwar 57 von 237 aller gemeldeten Vorkommnisse in den Jahren 1987 bis 2005, fielen in diese Kategorie [Boe06]. Bei dieser Art von Unfällen führt trotz eines technisch einwandfreien und korrekt funktionierenden Flugzeuges die Desorientierung der Cockpitcrew zu einer Kollision mit dem Gelände, Hindernissen oder Wasser. Die Desorientierung des Piloten ist dabei in der Regel auf eine fehlerhafte Interpretation der Instrumente oder einfach Unkenntnis des umgebenden Geländes zurückzuführen [May01] [Wie06].

Um gerade dieser Tatsache Rechnung zu tragen, sind seit zwei Jahrzehnten automatisierte Warnsysteme mit Darstellungskomponenten und 3D-Flugführungsanzeigen (Synthetic Vision Systems (SVS)) Inhalt vielfältiger Untersuchungen und Forschungsaktivitäten [Pur00] [Wie06]. Auch die Entwicklung von automatischen Warnsystemen, die zur Vermeidung von Flugzeugkollisionen (Traffic Alert and Warning System (TCAS)) und der gefährlichen Annäherung an umliegendes Gelände (Terrain Avoidance Warning System (TAWS)) eingeführt wurden, soll die Anzahl der Flugunfälle dezimieren [FSF99]. Ein bereits

erhältliches serienreifes Geländewarnsystem, welches den Piloten durch eine vorausschauende Geländewarnfunktion unterstützt, ist seit 1996 durch das Enhanced Ground Proximity Warning System (EGPWS) von Honeywell verfügbar [Hon07].

Um die notwendige Zuverlässigkeit der Warnsysteme, die eine Kollision mit dem Gelände vermeiden soll, zu erreichen, ist das Vorhandensein von Geländedatenbanken hoher Genauigkeit und Integrität eine notwendige Voraussetzung. In Abhängigkeit von der Flugphase, und somit einhergehend mit dem Unfallrisiko, steigen die Anforderungen an die verwendeten Geländedatenbanken [ICA04] [RTC05a].

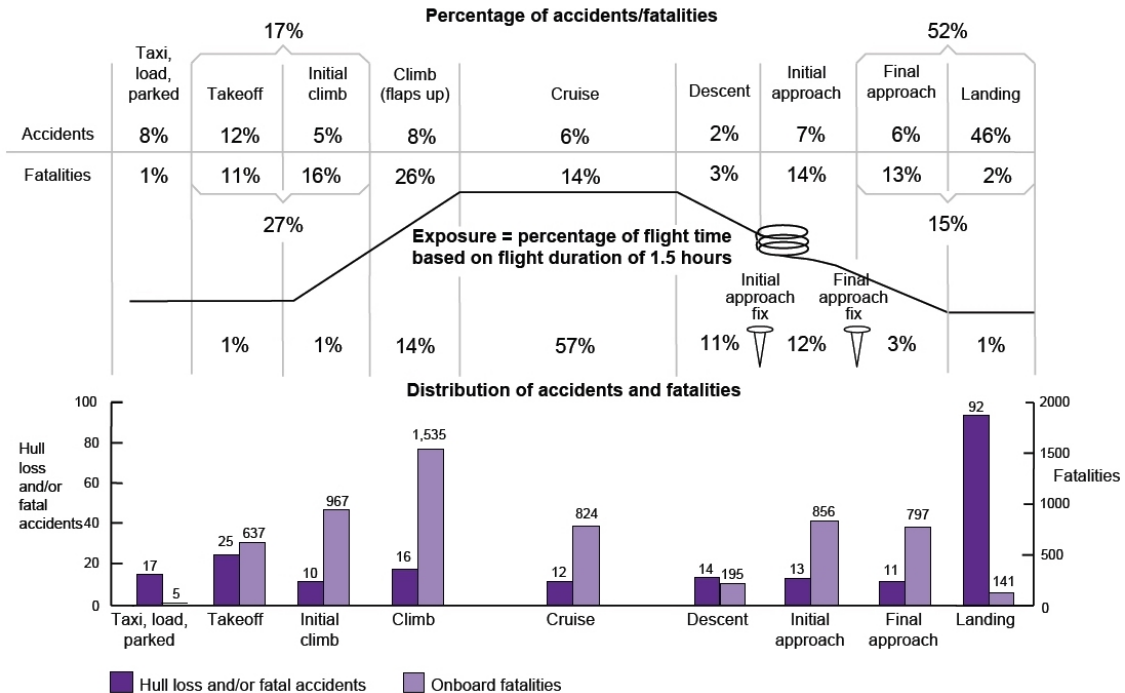


Abbildung 1.2: Unfälle nach Flugphasen 1996 bis 2005 [Boe06]

1.2.2 Tiefflug und Geländefolgeflug

Der Tiefflug stellt eine spezielle Form des Flugbetriebes dar. Tiefflüge finden hauptsächlich bei militärischen Einsätzen Anwendung, wobei eine „Search and Rescue“ (SAR) Mission durchaus Flugabschnitte des Tieffluges beinhaltet, aber dennoch zivile Anwendung findet [FLI98][BDV91].

Ziel des Tieffluges ist es, neben dem Absetzen bzw. Aufnehmen von Personen und Gegenständen, die gegnerische Luftabwehr bzw. Radar zu unterfliegen und somit ein Höchstmaß an Überlebensfähigkeit sicherzustellen. Auch in der Zeit der weltweiten Satellitenerfassungsmöglichkeit ist diese Option des Operierens unverzichtbar [FLI98].

1.2.2.1 Militärischer Tiefflug

Der Tiefflug kann mit strahlgetriebenen Kampflugzeugen, aber auch mit Transportluftfahrzeugen sowie Hubschraubern, praktiziert werden. Da der Tiefflug üblicherweise unter Sichtflugbedingungen erfolgt, werden in Abhängigkeit von Luftfahrzeit und Tageszeit unterschiedliche Mindestflughöhen definiert, die im Folgenden kurz erläutert werden sollen [FLI98]:

a) Strahlgetriebene Kampflugzeuge:

Der Tiefflugbetrieb am Tag wird nicht an bestimmte Streckenführungen oder Korridore gebunden, sondern erfolgt nach freier Streckenplanung, um eine möglichst weitgehende Verteilung des Tiefflugaufkommens zu erreichen. Die hierbei zulässige Mindesthöhe für

strahlgetriebene Kampfflugzeuge beträgt grundsätzlich 300 Meter (≈ 1000 ft) über Grund. In speziellen „Low Flying Areas“ (LFA) können in Einzelfällen Tiefflugmanöver in Höhen von bis zu 75 Meter (≈ 250 ft) über Grund durchgeführt werden [FLI98] [AFB07].

Der Nachttiefflug wird zur Sicherung des sonstigen Nachtflugverkehrs in einem Nachttiefflugsystem in Form von festen Korridoren durchgeführt. Die Mindestflughöhe beträgt 300 Meter (≈ 1000 ft) über Grund auf den dafür zugelassenen Streckenabschnitten [FLI98] [AFB07].

b) Transportflugzeuge

Im Rahmen des Lufttransports werden Fallschirmspringer, Lasten und Hilfsgüter auch aus niedriger Höhe abgesetzt. Der Tiefflug bietet dabei ein Höchstmaß an Überlebensfähigkeit. Die Mindestflughöhe für Transportluftfahrzeuge beträgt in Deutschland grundsätzlich 300 Meter über Grund [FLI98].

c) Hubschrauber

Die Mindestflughöhe für den Tiefflug von Hubschraubern im Personentransport beträgt 30 Meter (≈ 100 ft) über Grund oder Wasser. Mit besonderem Auftrag darf auf festgelegten Strecken bzw. in festgelegten Trainingsgebieten nach den Erfordernissen des Einsatzes bis zur Schwebeflughöhe, d.h. ca. 3 Meter über Grund oder Wasser, geflogen werden. Hindernisse wie Hochspannungsleitungen und Brücken dürfen aus taktischen Gründen im Einsatz und Übungsflugbetrieb unterflogen werden. In der Nacht beträgt die Mindestflughöhe für Tiefflüge ohne Nutzung der Restlichtverstärkerbrille grundsätzlich 150 Meter über Grund oder Wasser (≈ 500 ft), mit Restlichtverstärkerbrille auch darunter und zwar bis ca. 3 Meter über Grund oder Wasser [FLI98].

Neben der visuellen Orientierung mit Hilfe von traditionellen Navigationseinrichtungen eines Flugzeuges beim Tiefflug stehen Applikationen zur besseren Orientierung und Erhöhung des Situationsbewußtseins des Piloten hinsichtlich seines Zustandes im Raum zur Verfügung. Diese Verfahren der „Synthetischen Sichtsysteme“ wie auch der Geländewarnsysteme werden zu einem späteren Zeitpunkt in dieser Arbeit beschrieben.

1.2.2.2 Automatischer Tiefflug / Geländefolgeflug

Applikationen zum automatischen Tiefflug bzw. Geländefolgeflug stellen dem Piloten wie auch dem Autopiloten Informationen über die notwendige Steig- oder auch Sinkrate zur Verfügung, damit das Flugzeug so nah wie möglich die ausgewählte Flughöhe über dem Bodenprofil hinsichtlich des Flugvektors beibehalten kann [NAT07].

Neben den bereits vorgestellten Verfahren des visuell orientierten Tieffluges unter Tag- und Nachtbedingungen existieren Systeme der automatischen Tiefflugführung, wie sie zur Zeit von der EADS Military Air Systems für den Militärtransporter Airbus A400 entwickelt werden [EAD07].

Mit dem sogenannten Terrain Masking Low Level Flight (TMLLF) System können die Airbus A400 Transportflugzeuge sehr knapp über dem Boden, bei guter Sicht in nur 150 ft Höhe, fliegen und sind somit in bergigem Gelände vor Bedrohungen besser geschützt. Bei schlechter Sicht sind 500 ft Flughöhe bei automatischer Flugführung möglich. Ziel des TMLLF ist es, die Risiken während Missionen über feindlichem Gebiet zu minimieren. Dies wird durch die Aufbereitung und Darstellung der taktischen Lage sowie durch eine durchgängige Prozeßkette von der Flugwegplanung bis zur Ausführung erreicht. Das System plant automatisch und autonom die optimale Route. Dabei wird errechnet, wie Gebiete, in denen der A400M für feindliche Sensoren sichtbar ist, vermieden werden. Das System gibt, angepaßt an die Geländetopographie, die beste Streckenführung vor. Um den optimierten Trajektorien folgen zu können, hat EADS Military Air Systems einen Autopiloten entwickelt, der mit einem Flight Director und einer automatischen Schubregelung kombiniert ist. Sämtliche Informationen zur Planung einer sicheren Strecke werden zusammengeführt und so

aufbereitet, daß die Crew mit Hilfe einer Gefahrenkarte sofort erfassen kann, wie das TMLLF-System den A400M um Gefahrenzonen herumführt [EAD07] [Pal04].

Das TMLLF wird auf eine vorprozessierte Datenbank zur Berechnung von Gelände- und Gefahrendaten zurückgreifen, in der hochgenaue Geländedaten hinterlegt sind. Diese Daten werden durch die Komponenten des Pre-Processings von Flugrouten, der Flugroutenverwaltung, den visuellen Anzeigesystemen sowie der Flugsteuerung und Flugkontrolle des Systems genutzt [Pal04].

1.2.3 Search and Rescue Missionen (SAR)

Ursprünglich für die Suche und Rettung (SAR) von abgestürzten oder notgelandeten Luftfahrzeugen konzipiert, entwickelte sich der SAR-Dienst zu einer nationalen Aufgabe und einem wesentlichen Bestandteil des medizinischen Notversorgungssystems der Bundesrepublik Deutschland. Diese Aufgabe wird auf dem Luftweg neben zivilen Hubschraubern auch von der Luftwaffe wahrgenommen [FLI98].

Der Einsatzflugbetrieb im SAR- und zivilen Rettungsdienst unterliegt grundsätzlich den geltenden Flugbetriebsbestimmungen. Geht es bei den Einsätzen dieser Art allerdings ganz konkret um den Erhalt von Menschenleben, darf der verantwortliche Luftfahrzeugführer im Rahmen einer Güterabwägung im Einzelfall von den Flugbetriebsbestimmungen abweichen (z.B. Unterschreitung der Mindestflughöhen) [FLI98].

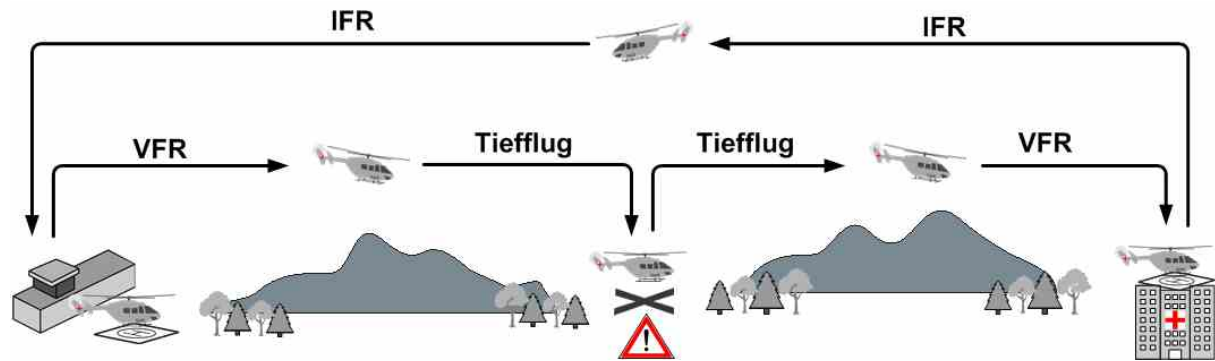


Abbildung 1.3: Charakteristische Flugphasen einer SAR Mission

Betrachtet man eine SAR Mission im Ganzen, läßt sich feststellen, daß ein Helikopterrettungsflug eine Mischform der verschiedenen Missionstypen darstellt. Wie in Abbildung 1.3 dargestellt, können drei mögliche Flugverfahren identifiziert werden. Zu Beginn eines Rettungsfluges befindet sich ein SAR-Helikopter meist auf seiner Basis. Nach Erhalt eines Notrufes begibt er sich an die Unfallstelle. In Abhängigkeit von der Länge des Anfluges fliegt der Helikopter sofort nach Sichtflugregeln (VFR) im unkontrollierten Luftraum oder der erste Teil des Fluges erfolgt im kontrollierten Luftraum. Je nach Luftraumklasse finden Verfahren des Instrumentenfluges (IFR), und bzw. oder des Sichtfluges (VFR), Anwendung. Ist der Einsatzort schließlich erreicht, werden die geltenden Mindestflughöhen unterschritten und der Helikopter begibt sich bis zur Landung in einen Tiefflug. Ist die Bergung des Opfers erfolgt, fliegt der Rettungshubschrauber in eine geeignete Unfallklinik. In Abhängigkeit des Weges, der Art der Erkrankung des Opfers sowie der Art des Landeplatzes an der Klinik, wird sich der Pilot primär des Sichtfluges bedienen. Nach Übergabe des Patienten kehrt der Helikopter an seine Basis zurück. Sofern der Helikopter eine IFR Zulassung besitzt, ist zu erwarten, daß diese Phase der Überführung im kontrollierten Luftraum durchgeführt wird.

Es zeigt sich also, daß eine SAR Mission einen sehr heterogenen Charakter aufweist, der alle oben beschriebenen Missionstypen beinhaltet.

1.2.4 Diskussion

Betrachtet man alle vorgestellten Missionstypen wird deutlich, daß Start und Landung stets einen zentralen Teil aller vorgestellten Operationen darstellen. Das Starten wie auch das Landen eines Flugzeuges implizieren immer, daß es zu einer gewollten bodennahen Flugbewegung kommt, bei der auf jeden Fall eine Kollision mit dem darunterliegenden Gelände vermieden werden soll. Bei einigen Flugvorgängen, wie etwa dem Fliegen im kontrollierten Luftraum, ist es ein Bestreben, diese kritische Flugphase möglichst auf einen kurzen Zeitraum zu begrenzen. Ziel ist es, möglichst schnell die Reiseflughöhe zu erreichen, bei der eine Geländekollision keine akute Bedrohung darstellt. Bei anderen Missionsarten hingegen, wie beispielsweise beim Tiefflug, dem Geländefolgeflug oder bei SAR Einsätzen, ist es ein zentraler Bestandteil des Unternehmens, den Flugkörper möglichst nah über dem Boden zu bewegen und auch dabei eine Kollision zu verhindern. Egal wie lange sich das Flugzeug in der Nähe des Bodens aufhält, ist es für alle Missionsarten eine absolute Notwendigkeit, möglichst genaue Informationen hinsichtlich der eigenen Position im umgebenden Gelände zu erlangen, um das Gelingen der Mission sicherzustellen. Ist hierbei die Sicht zusätzlich durch schlechtes Wetter oder tageszeitbedingt beeinträchtigt, können digitale Höheninformationen das Situationsbewußtsein der Cockpitbesatzung deutlich erhöhen.

Sind auch die hier vorgestellten Missionstypen hinsichtlich ihrer Zielsetzung zum Teil doch sehr verschieden, so haben sie doch alle das gemeinsame Bestreben, sofern es zu einer Annäherung an den Boden kommt, eine Kollision mit diesem auf jeden Fall zu vermeiden. Aus diesem Grund wurden eine Vielzahl an Systemen und Verfahren entwickelt, die sich zum Ziel gesetzt haben, sowohl bei der Flugplanung wie auch bei der Flugdurchführung dieses Risiko zu minimieren, wenn nicht sogar auszuschließen. Grundlage für ein erfolgreiches Operieren stellt allerdings zu einem großen Teil die verwendete Datenbasis dar. Doch drängt sich hier die Frage nach der Verfügbarkeit wie auch der Qualität des Datenmaterials auf. Aus diesem Grund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Analyse und Bewertung von digitalen Höheninformationen sowie ihrem Potential hinsichtlich einer Anwendung in sicherheitskritischen Flugphasen.

1.3 Struktur der vorliegenden Arbeit

Zu Beginn der vorliegenden Untersuchung werden die Eigenschaften und Charakteristika von digitalen Höhenmodellen beschrieben. Von besonderem Interesse sind hierbei die Darstellungsweisen von digitalen Höheninformationen hinsichtlich ihrer Abbildung der Erdoberfläche. Nachfolgend wird die Funktionsweise wie auch das Potential der wichtigsten Generierungsmethoden beschrieben. Schließlich erfolgt eine Vorstellung der Organisationsformen von elektronischen Geländedaten. Am Ende dieses Abschnittes erfolgt eine Beschreibung der Erdmodelle und Bezugssysteme. Ebenfalls werden in der Luftfahrt verwendete Referenzsysteme vorgestellt.

Anschließend werden die wichtigsten Anwendungsgebiete von Geländedaten in der Luftfahrt betrachtet. Zuerst werden anerkannte und verbindliche Standards der RTCA/EUROCAE sowie der ICAO hinsichtlich ihrer Geltungsbereiche sowie der dort beschriebenen Anforderungen erläutert und diskutiert. Der Vorstellung der maßgeblichen Spezifikationen angeschlossen, werden die wichtigsten Anwendungsbereiche sowie die Notwendigkeit von entsprechenden Höheninformationen dargelegt.

Basierend auf den vorangegangenen Darstellungen über die Notwendigkeit von digitalen Höheninformationen hoher Genauigkeit und Integrität für Luftfahrtanwendungen, wird schließlich ein Konzept zur Modifikation von Höhendaten beschrieben. Mit diesem ist es möglich, Geländedatensätze so zu modifizieren, daß diese den Anforderungen bestimmter Anwendungsgebiete genügen, ohne daß die ursprünglichen Datensätze die notwendige

Qualität aufweisen. Nach einer Erläuterung der Verfahrensweise werden die untersuchten Geländemodelle, die Untersuchungsgebiete sowie die betrachteten Einflußfaktoren beschrieben. Danach erfolgt eine Beschreibung der notwendigen Verfahren zur Bewertung von Geländemodellen wie auch der dazugehörigen Qualitätsparameter.

Anschließend wird die Realisierung der Untersuchung vorgestellt. Diese beinhaltet die Anpassung der Formate der zu untersuchenden Datensätze wie auch die Verifikation der Referenzdaten. Basierend auf den ermittelten Qualitätsparametern dieser Arbeitsschritte resultiert die Analyse der zu bewertenden Höhenmodelle. Dieser Analysevorgang erfolgt zum einen für komplette Datensätze, zum anderen werden in einem zweiten Schritt bestimmte Einflußfaktoren separat betrachtet, um die Auswirkungen bestimmter Randbedingungen detailliert quantifizieren zu können. Beruhend auf diesen Erkenntnissen erfolgt schließlich die Definition der „Safety Buffer“, die zum Erreichen der angestrebten Genauigkeit notwendig sind. Diese werden schließlich auf die zu untersuchenden Höhenmodelle gelegt und die modifizierten Datensätze erneut verifiziert.

Zuletzt wird eine abschließende Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich einer Eignung für Luftfahrtanwendungen vorgenommen. Hierbei wird sowohl die Anwendbarkeit der originalen wie auch der modifizierten Höhenmodelle darlegt. Ferner wird das angewendete Verfahren hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit aber auch seiner Defizite diskutiert. Verbesserungen der Methodik für zukünftige Untersuchungen werden vorgestellt.

Geschlossen wird die hier vorgestellte Untersuchung mit einer kurzen Zusammenfassung und einem Ausblick auf eine mögliche Nutzung der Resultate für zukünftige Datensätze und Anwendungsgebiete.

2 Digitale Höhenmodelle

Digitale Höhenmodelle (DHM), englisch *Digital Elevation Model (DEM)* genannt, dienen zur Darstellung von dreidimensionalen Höheninformationen der Erdoberfläche (siehe Abbildung 2.1), wobei sich die verfügbaren Informationen meist auf die Bereiche des Festlandes beschränken. Zur Gewinnung solcher Höhendaten kommen sowohl Methoden der terrestrischen Vermessung als auch der Fernerkundung zum Einsatz. Je nach Art der angewandten Generierungsmethode, können Geländedaten verschiedene Repräsentationen der Erdoberfläche wiedergeben. Hierbei kann prinzipiell zwischen Oberflächenmodellen und Geländemodellen unterschieden werden. Ferner können digitale Höhendaten auf unterschiedliche Weise gespeichert bzw. dargestellt werden.

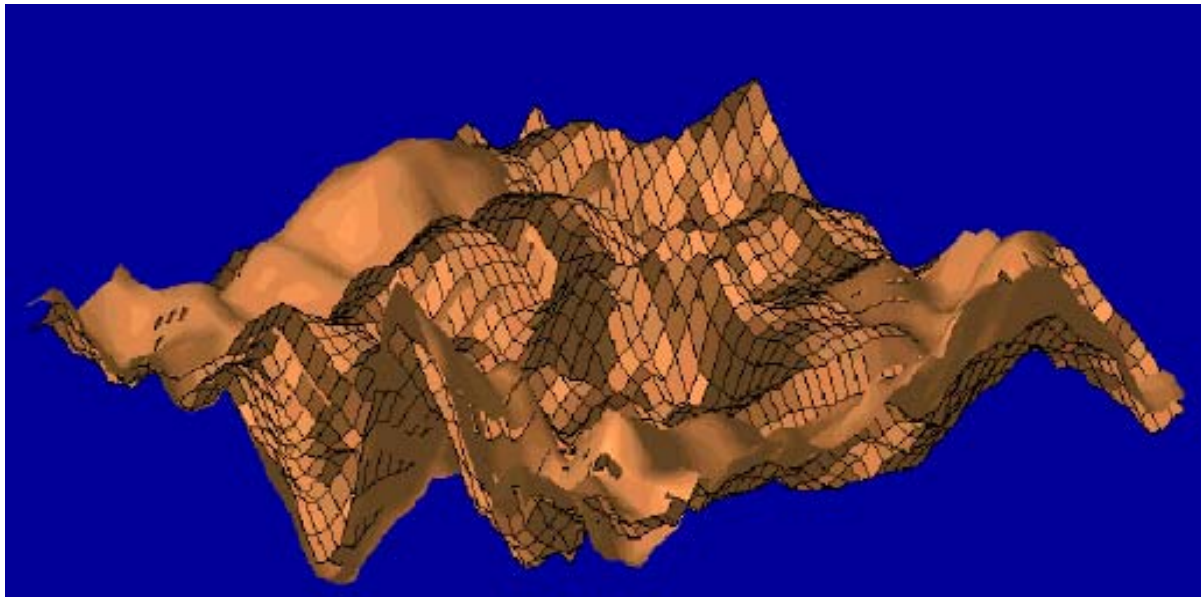


Abbildung 2.1: Beispiel eines digitalen Höhenmodells [RTC05a]

Um die Komplexität von Geländedaten sowie die zu berücksichtigenden Aspekte bei deren Nutzung darzulegen, sollen im Folgenden alle relevanten Eigenschaften von digitalen Höhenmodellen eingehend erläutert werden.

2.1 Darstellungsweisen eines DHM

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von Digitalen Höhenmodellen (DHM bzw. DEM): Zum einen das „Digitale Geländemodell“ (DGM) und zum anderen das „Digitale Oberflächenmodell“ (DOM). Allerdings stellen diese Geländedarstellungsweisen Idealformen dar und können in Abhängigkeit von der Generierungsmethode durchaus erheblich von der Realität abweichen.

Werden die Höheninformationen mittels Methoden der Fernerkundung gewonnen, die mit Ausnahme der Photogrammetrie mit aktiven Sensoren arbeiten, kann je nach Oberflächeneigenschaft der Erdbedeckung ein Eindringen bzw. Reflektieren der ausgesendeten Strahlung erfolgen. Diese Tatsache führt dazu, daß eine dritte Darstellungsform identifiziert werden kann: das „Digitale Höhenmodell als reflektierte Oberfläche“ [RTC05a]. Abbildung 2.2 zeigt eine Übersicht der drei verschiedenen Geländedarstellungsformen, die nachfolgend im Detail beschrieben werden.

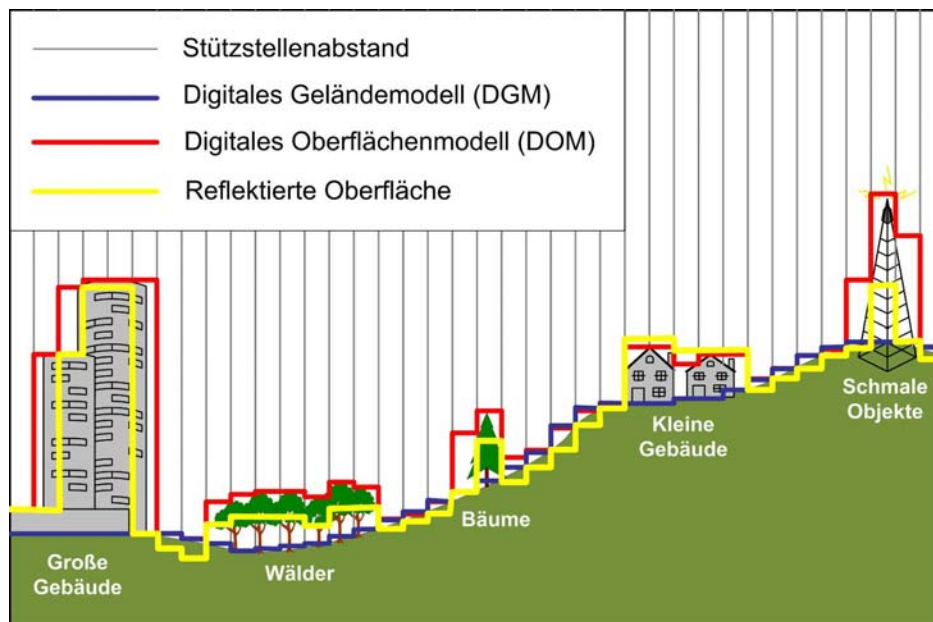
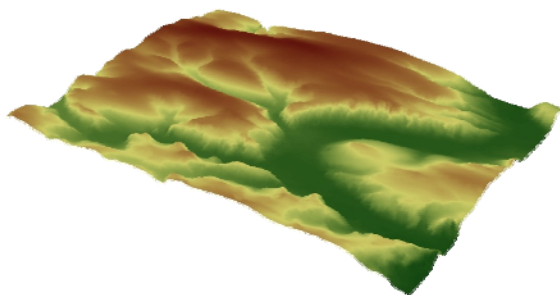


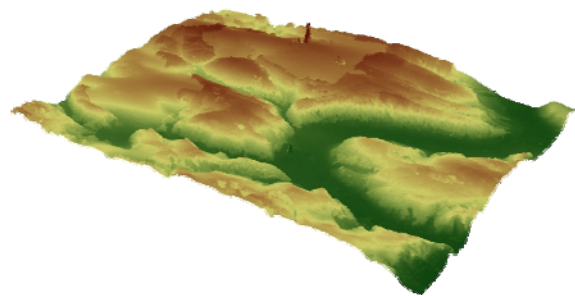
Abbildung 2.2: Darstellungsformen von Digitalen Höhenmodellen

2.1.1 Digitale Geländemodelle (DGM)

Digitale Geländemodelle, im englischen *Digital Terrain Model (DTM)* genannt, stellen die Oberfläche der Erde ohne jegliche Bedeckung dar (siehe Abbildung 2.3 a.). Das heißt, es wird die nackte Erdoberfläche ohne Bebauung und Vegetation wiedergegeben [RTC05a]. Diese Form der Geländedarstellung ist oftmals ein Produkt der terrestrischen Vermessung. Solche Höhenmodelle können beispielsweise durch die Digitalisierung von Höhenlinienkartierungen gewonnen werden. Heutzutage gewinnen jedoch auch hier fernerkundliche Vermessungstechniken an Bedeutung.



a.) DGM



b.) DOM

Abbildung 2.3: Digitale Geländemodelle

Diese Geländedarstellungsform ist für die Luftfahrt von untergeordnetem Interesse, da Hindernisse wie Vegetation und Bebauung nicht durch den Datensatz wiedergegeben werden. Wird ein solcher Datensatz in der Luftfahrt verwandt, ist die Verfügbarkeit von Hindernisdaten (engl. *Obstacle Data*) unabdingbar.

2.1.2 Digitale Oberflächenmodelle (DOM)

Eine weitere Form der Darstellung von elektronischen Höhenmodellen ist das Digitale Oberflächenmodell (DOM). In einem DOM ist idealerweise die Erdoberfläche mitsamt seiner Bedeckung abgebildet (siehe Abbildung 2.3 b.). Zur Veranschaulichung stelle man sich ein über die Erdoberfläche gelegtes Tuch vor [RTC05a]. Könnte eine entsprechende Gelände-

datenbank in der Praxis bereitgestellt werden, bildete diese sicher die optimale Datengrundlage für Luftfahrtanwendungen. Insofern Hindernisse in der Geländedatenbank erfaßt wären, müßte keine zusätzliche Hindernisdatenbank mitgeführt werden. Um allerdings jedes Hindernis in einer Geländedatenbank abbilden zu können, müßte die Auflösung der Daten so hoch sein, daß eine Verarbeitung und Verwaltung der Datenmenge mit heutigen Rechnersystemen nicht möglich wäre. Zum anderen müßte eine exakte Vermessung der wirklichen Oberfläche des Geländes durchgeführt werden. Da allerdings bis heute keine automatisierten Verfahren zur Verfügung stehen, die dieses hohe Maß an Genauigkeit erfüllen, wäre dies mit einem enormen Aufwand und erheblichen Kosten verbunden. Demnach dürfte ein entsprechendes Verfahren an der Umsetzbarkeit sowie einer eingeschränkten Praxis-tauglichkeit scheitern.

Eine geeignete Generierungsmethode zur Erstellung eines Datensatzes mit hoher Genauigkeit stellt beispielsweise die Stereo-Photogrammetrie dar, wobei diese aufgrund ihrer enormen Arbeitsintensität nur für begrenzte Bereiche sinnvoll eingesetzt werden kann. Vor diesem Hintergrund erscheint es notwendig, Generierungsmethoden zu identifizieren, welche den Anforderungen eines DOM gerecht werden aber dennoch für die Erstellung von Datensätzen größerer Bereiche geeignet sind [HEK05].

2.1.3 Digitales Höhenmodell als reflektierte Oberfläche

Zur Erstellung eines Geländedatensatzes, welches ein DOM wiedergeben soll, werden sinnvollerweise auf Fernerkundung basierende Vermessungstechniken angewandt. Diese erlauben einen Blick von oben auf die Erdoberfläche und ermöglichen somit eine Geländeaufnahme samt Oberflächenbedeckung. Neben dem bereits erwähnten Verfahren der Stereo-Photogrammetrie, welches mit einem passiven Sensor (Kamera) arbeitet, finden Vermessungstechniken Einsatz, die mit aktiven Sensoren arbeiten. Hierbei sind Methoden der Radarvermessung und des Laserscannings von besonderer Bedeutung.

Allerdings wirkt sich bei Vermessungsmethoden, die auf aktiven Sensoren basieren, nachteilig aus, daß diese zum einen die zu vermessende Oberfläche penetrieren, zum anderen von den aufgenommenen Oberflächen reflektiert werden [Alb01] [RTC05a].

Daneben hat die Reflektionseigenschaft der Oberflächen einen signifikanten Einfluß auf den Generierungsprozeß von digitalen Geländemodellen unter der Verwendung von aktiven Sensoren. Je nach Rauigkeit des aufgenommenen Geländeabschnittes wird die ausgesendete Strahlung reflektiert und die Intensität des Rücklaufes bestimmt [Alb01].

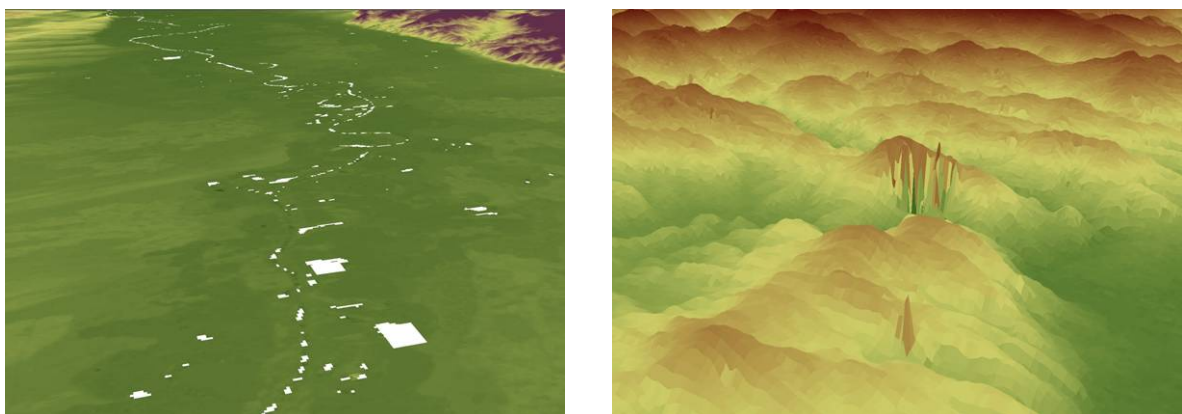


Abbildung 2.4: Datenlücken und Störungen in SRTM X-Band Geländedaten

Betrachtet man diese Faktoren, läßt sich erkennen, daß bei der Aufnahme eines digitalen Höhenmodells mit Hilfe von aktiven Sensoren weder ein DGM noch ein DOM ohne eine entsprechende Korrektur der Daten bereitgestellt werden kann. Vielmehr handelt es sich bei diesen Datensätzen um ein Abbild der reflektierten Oberfläche. Somit muß bei der

Beschreibung von digitalen Höhenmodellen eine dritte Form der Geländedarstellung eingeführt werden: das *DHM als reflektierte Oberfläche*, welches eine Art Mischform eines DGM und DOM darstellt [May01].

Abbildung 2.4 zeigt Datenlücken und Störungen in SRTM X-Band Geländedaten wie sie ohne Korrektur von dem Radarsensor aufgezeichnet wurden. Hierbei läßt sich erkennen, daß die Reflektionseigenschaften der aufgenommenen Oberfläche direkt mit der Qualität und Vollständigkeit der Höheninformationen in Zusammenhang stehen.

2.2 Generierungsmethoden

Digitale Höhenmodelle können mit Hilfe verschiedener Verfahren erfaßt werden. Die gängigsten Verfahren sind nach [May01] hierbei:

- Erfassung über Luft-/ Satellitenbilder (Stereo-Photogrammetrie)
- Erfassung über SAR (Synthetic Aperture Radar) Interferometrie
- Laserscanning
- Erfassung über Kartenscanverfahren

Während Verfahren wie das Kartenscanverfahren zunehmend an Bedeutung verlieren, werden Techniken der Fernerkundung wie Laserscanning oder SAR-Interferometrie immer bedeutsamer.

Nachfolgend werden die Eigenschaften und Techniken der verschiedenen Generierungsmethoden im Einzelnen beschrieben.

2.2.1 Erfassung über Luft-/ Satellitenbilder (Stereo-Photogrammetrie)

Die Methode der Stereo-Photogrammetrie ist seit Anfang der 1980er Jahre ein weit verbreitetes Verfahren, um digitale Höhenmodelle größerer Bereiche mit hoher Genauigkeit und im Vergleich zu Verfahren der terrestrischen Vermessung guter Wirtschaftlichkeit zu generieren. Zum Einsatz kommen hierbei sowohl Verfahren operatorgestützter visueller Auswertungen sowie halb- oder vollautomatische digitale Bildauswertungs- und Generierungsprozesse [May01] [Wie06]. Als Photogrammetrie bezeichnet man das Verfahren, Luftbilder in ihrer räumlichen Geometrie auszuwerten und in einen Bezug zu den tatsächlichen Koordinaten eines geographischen Bezugssystems zu bringen [Alb01].

2.2.1.1 Eigenschaften von Luft-/Satellitenbildern

Basis für die Generierung der Geländedaten sind stereoskopische Luftbildaufnahmen, die anhand von Flugzeugüberfliegungen oder Satelliten gewonnen werden. Luft- und Satellitenbilder nehmen Strahlung im sichtbaren Licht (etwa 0,4 - 1µm) sowie im nahen Infrarot (bis 2,5 µm) auf [Alb01]. Vorteilhaft an der Aufnahmetechnik von Luftbildern ist, daß das Aufnahmemedium (der Film) auch gleichzeitig das Speichermedium ist, was gegenüber anderen nachfolgend vorgestellten Systemen zu einer gravierenden Kosten- und Platzersparnis führt.

Um alle notwendigen Informationen des Bildproduktes bereithalten zu können, werden bei der Belichtung des Luftbildes die Rahmenmarken der Luftbildkamera mit auf dem Luftbild abgebildet, um das physikalische Projektionszentrum zu definieren. Werden die gegenüberliegenden Rahmenmarken (Fiducial Marks) miteinander verbunden, ergibt der Schnittpunkt den optischen Mittelpunkt des Luftbildes, den Hauptpunkt (Principle Point) [Wei83].

Um die auf dem Bild vorhandenen Informationen optimal nutzen zu können, müssen die Aufnahmen senkrecht nach unten zur Flugrichtung aufgenommen werden. Klassische Luftbilder besitzen daher durch die optischen Eigenschaften des Linsensystems eine *Zentralperspektive*. Der Principle Point oder Nadirpunkt ist ein genau senkrecht unter der

Objektivmitte liegender Punkt auf der Erdoberfläche. Entsprechend ist der photographische Nadir definiert als Schnittpunkt einer vertikalen Verbindungslinie vom Nadirpunkt am Boden durch die Objektivmitte auf die Bildebene (vgl. Abbildung 2.5) [Cam96].

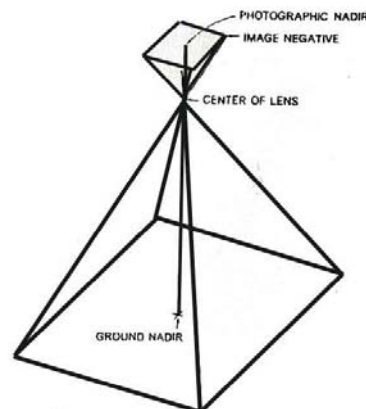
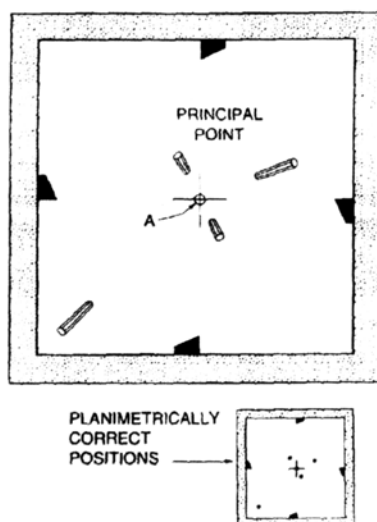
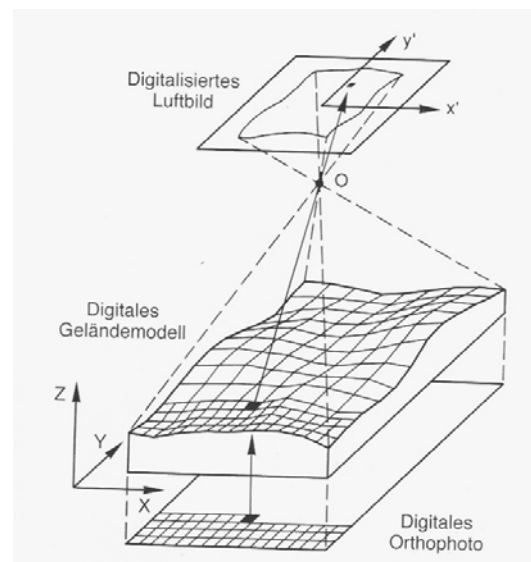


Abbildung 2.5: Geometrie einer Senkrechtaufnahme [Cam96]

Für alle Bildbereiche außerhalb des Nadirs kommt es zu einer Reliefverschiebung, die auffälligste Quelle für Lagefehler in Luftbildern. Ursache für die Reliefverschiebung ist die zentralperspektivische Darstellung des optischen Systems einer Kamera. Objekte, die sich direkt unter dem Mittelpunkt der Kamera befinden, werden nur mit ihrer Oberfläche auf dem Luftbild dargestellt. Weiter außen liegende Objekte werden so abgebildet, daß man sowohl ihre Oberfläche als auch ihre Seiten erkennen kann. Dieses Kippen tritt radial um den Nadirpunkt auf und verstärkt sich mit zunehmender Entfernung vom Nadirpunkt und mit der Objekthöhe (siehe Abbildung 2.6).



Reliefverschiebung [Cam96]



Differentialverzerrung [Alb01]

Abbildung 2.6: Reliefverschiebung und Differentialverzerrung von Luftbildern

Die Reliefverschiebung ist ebenfalls von der Flughöhe und der Brennweite abhängig. Je größer die beiden Faktoren sind, desto geringer ist die Verschiebung. Demnach hat das Originalbild keinen einheitlichen Maßstab. Die negativen Auswirkungen der

Zentralperspektive können durch die Umbildung des Originalbildes in ein Bild mit Parallelprojektion (Orthogonalprojektion) beseitigt werden. Hierzu ist das Vorhandensein eines digitalen Geländemodells unerlässlich, steht die Reliefverschiebung doch auch immer im Zusammenhang mit der Geländehöhe. Das durch die sogenannte Differentialentzerrung entstandene Produkt wird als „Orthophoto“ bezeichnet (siehe Abbildung 2.6) [Cam96] [Alb01].

2.2.1.2 Stereoskopische Auswertung

Vergleicht man zwei Aufnahmen derselben Oberfläche, die aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen wurden, so erkennt man eine Verschiebung der Lage von gleichen Objekten in beiden Bildern. Diese Lageverschiebung wird als *Stereoparallaxe* bezeichnet. Die Stereoparallaxe verringert sich mit abnehmender Entfernung des Objektes zum Beobachter und kann daher als Grundlage zum Messen von Entfernungen oder bei Senkrechtaufnahmen zum Messen der Höhe von Objekten verwendet werden. Fixiert man zwei aufeinanderfolgende Luftbilder mit mindestens 50% Überlappung auf einer Oberfläche, so läßt sich die Höhe wie folgt manuell berechnen,

$$h = \frac{H * dp}{P + dp} \quad (2.1)$$

wobei H die Flughöhe, dp das Differential der Parallaxe von A-B, P die Differenz von X und Y und h die Objekthöhe bedeutet [Cam96].

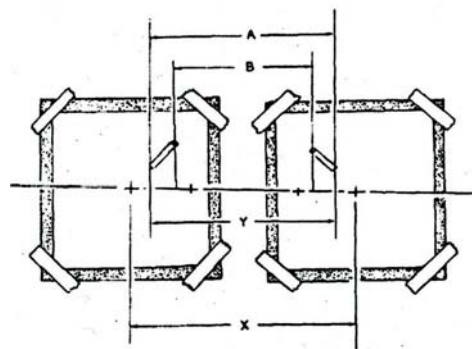


Abbildung 2.7: Berechnung der Höhe eines Objektes aus der Stereoparallaxe [Cam96]

Das Prinzip des stereoskopischen Sehens beruht auf der Fähigkeit des menschlichen Gehirns, ein Objekt, das aufgrund des Augenabstandes aus unterschiedlichen Positionen und aus unterschiedlicher Entfernung gesehen wird, zu einem räumlichen, dreidimensionalen Gegenstand zu verarbeiten. Bei der Betrachtung mit einer sogenannten „Shutter Brille“ werden auf dem Monitor die beiden ungleichen Bildpaare übereinander gelegt. Ein Infrarotsensor auf dem Monitor sendet an diese „aktive“ 3D-Brille Signale, in deren Rhythmus sie abwechselnd das rechte und das linke Auge verdunkelt. Bei diesem auch als „*stereo in a window*“ bezeichneten Verfahren werden abwechselnd die beiden unterschiedlichen Perspektiven gesehen und man erhält einen räumlichen Eindruck. Im Gegensatz dazu werden beim „passiven Anaglyphen-Verfahren“ zwei Bilder mit einem bestimmten Überlappungsbereich in Komplementärfarben (meist rot/grün) übereinander projiziert. Betrachtet man hierbei die komplementärfarbigten Doppelbilder durch eine Brille mit Lichtfilter in den gleichen Komplementärfarben, so sieht jedes Auge nur das zur Filterfarbe komplementäre Bild, das gleichfarbige hingegen wird ausgelöscht. Im gemeinsamen Sehvorgang beider Augen entsteht das Raummodell [KW94].

Verschiedene Bedingungen und Verhältnisse können die stereoskopische Visualisierung und Auswertung jedoch beeinträchtigen oder verhindern:

- uneinheitliche Flughöhe zwischen den Aufnahmen (Maßstabsunterschiede)
- große Unterschiede in der äußeren Orientierung der Bilder aufgrund unterschiedlicher Aufnahmewinkel
- fehlerhafte oder ungenaue innere Orientierungswerte verursachen große Parallaxenunterschiede

Aber auch nur ein geringes Auftreten der genannten Punkte kann das stereoskopische Sehen beeinträchtigen. Diese Beeinträchtigungen treten dann jedoch nur bei sehr starkem Hineinzoomen in die Bildpaare auf. Ein Zoomlevel von 1:2 bietet häufig die besten Ergebnisse [KW94].

2.2.1.3 Akquisition des Bildmaterials

Zur Bestimmung des Höhenwertes einer Koordinate (entspricht einem Bildpunkt mit x-y-Wert), muß für die stereoskopische Auswertung die reale Erdoberfläche aus zwei unterschiedlichen Blickrichtungen aufgenommen werden. Die daraus resultierende Stereo-Parallaxe je Bildpunkt ermöglicht anschließend die Berechnung des zugehörigen Höhenwerts [Cam96].

Die meisten Luftbilder für zivile Nutzungen werden mit metrischen Kameras aufgenommen. Sie erzeugen qualitativ hochwertige Bilder mit minimaler optischer und geometrischer Verzerrung. Damit der Film auf der Bildebene völlig eben aufliegt, wird er durch ein Vakuum angesaugt.

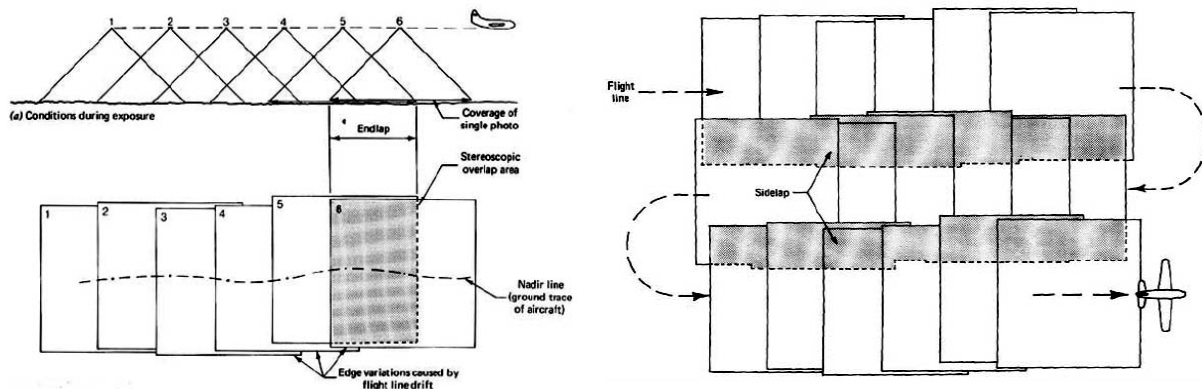


Abbildung 2.8: Stereobildflüge [LK87]

Meist beschränkt sich das Interesse jedoch nicht nur auf ein Gebiet, das auf einem einzelnen Luftbild abgebildet ist. So wird es nötig, eine flächenhafte Aufnahme von Luftbildern durchzuführen. Hierzu werden flugzeuggestützte Luftbildbefliegungen durchgeführt. Luftbildbefliegungen werden unterschieden in Einzelbefliegungen, Blockbefliegungen und Streifenbefliegungen, wobei Block- und Streifenbefliegungen das Generieren von Stereobildern erlauben (siehe Abbildung 2.8) [LK07].

Hierzu werden Einzelbilder mit einer Überlappung von 60% erzeugt. Sobald die Überlappung größer als 50% ist, ist der optische Bildmittelpunkt (Principle Point) des vorherigen Bildes auf dem neuen Bild mit abgebildet. Bei einer flächenhaften Befliegung wird mit mindestens 30% Seitenüberlappung der Bilder geflogen, um den Zusammenhalt des Bildmaterials durch möglichst viele identische Gebiete auf den Bildern zu gewährleisten. So können Streifen zur Blockbildung in Bezug zueinander gesetzt werden und stereoskopisch ausgewertet werden (vgl. Abbildung 2.8) [LK07].

Abhängig von der Art der Anwendung sind bei der Luftbildaufnahme sowohl Zeit- wie auch Wetterbedingungen zu beachten. Beispielsweise kann je nach Fragestellung von Interesse sein, ob die Belaubung der Bäume gewünscht wird. Somit wird die Wahl der Jahreszeit zu einem zu berücksichtigenden Faktor. Die Wetterbedingungen betreffend, ist ein klarer Himmel (max. 2/8 Bewölkung) oder diffuses Licht unter geschlossener hoher Wolkendecke von Vorteil. Dabei sind Letztere nur im Sommer möglich und nur gelegentlich für Stadtbefliegungen gewünscht, um den Schattenwurf zu minimieren. Dafür ergeben sie relativ kontrastschwache Bilder. Die bevorzugte Befliegungsrichtung ist wegen der einheitlichen Beleuchtung von West nach Ost [KW94].

2.2.1.4 Digitalisierung des Bildmaterials

Die aufgezeichneten Luftbilder werden schließlich digitalisiert. Zur Digitalisierung werden hochpräzise photogrammetrische Luftbildscanner benutzt. Damit keine Information verloren geht, wird das Digitalisierungsintervall dem Auflösungsvermögen des analogen Bildes angepaßt. Das Auflösungsvermögen (AV) wird in Linienpaaren/mm (LP/MM) angegeben. Damit ergibt sich nach [KW94] ein Digitalisierungsintervall ΔD [mm] von:

$$\Delta D \leq \frac{1}{2 * AV} \quad (2.2)$$

Zur interaktiven visuellen Identifizierung von Hindernisdaten sind Bodenauflösungen von 0,2 m ausreichend. Dies entspricht bei einem Bildmaßstab von 1:10.000 einem Digitalisierungsintervall von 20 μ m [FSL01].

Die Genauigkeit, die mit der Photogrammetrie erreicht werden kann, ist ebenfalls direkt davon abhängig, wie exakt Paßpunkte bestimmt werden können. Dies wiederum ist, abgesehen von der Genauigkeit der Paßpunkte, von der Luftbildqualität und auch von der Erfahrung des Stereobildauswerters abhängig. Er muß den Cursor im Objektmodell in Übereinstimmung mit der Oberfläche des zu messenden Objektes bringen. Die Genauigkeit, mit der das möglich ist, hängt sehr von der Auflösung des analogen Luftbildes und des Digitalisierungsintervalls ab. Auflösung unterscheidet man in spektrale Auflösung (die Fähigkeit des Sensors verschiedene Wellenlängen des radiometrischen Spektrums aufzeichnen zu können), radiometrische Auflösung (die Fähigkeit des Sensors die Intensität des spektralen Wellenbereiches aufzeichnen zu können) sowie die analoge Auflösung (die Fähigkeit eines Sensors das kleinstmögliche Objekt darstellen zu können bzw. die maximal mögliche Anzahl an Linienpaaren einer Filmemulsion oder eines elektrischen Sensors) [KW94].

Weiterhin wichtig ist der geometrische Lagefehler beim Scannen, die relative horizontale und vertikale Streifengenauigkeit, die Definitionssicherheit natürlicher Paßpunkte sowie der Lagefehler beim Einmessen der Paßpunkte [FSL01].

2.2.1.5 Orientierung des Bildmaterials

1.) Innere Orientierung

Die innere Orientierung ermöglicht die Transformation der gescannten Luftbilder auf die Koordinaten der Kamera-Rahmenmarken. Im optimalen Fall bestimmen die Brennweite (Kammerakonstante c) und die Koordinaten des Hauptpunktes die innere Orientierung eines Bildes. Zur physischen Definition des Bildkoordinatensystems und des zugeordneten Projektionszentrums werden auf dem Luftbild Rahmenmarken (Fiducial Marks) abgebildet. Der Schnittpunkt der Rahmenmarken wird als Bildhauptpunkt (Principle Point) bezeichnet. Die innere Orientierung wird dadurch hergestellt, daß man die gemessenen Ist-Koordinaten der Rahmenmarken auf deren kalibrierte Sollkoordinaten transformiert und dadurch die regelmäßigen Anteile der Bilddeformation wieder aufhebt [KW94].

2.) Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung bewerkstelligt die Transformation der Bildkoordinaten auf Objekt-(Grund-)Koordinaten. Durch Herstellung der äußeren Orientierung soll über eine Gleichung die Beziehung zwischen (bereinigten) Bildkoordinaten und der Lage des Bildinhalts in einem Landeskoordinatensystem hergestellt werden [KW94]. Da die Parameter der äußeren Orientierung während des Bildfluges in der Regel nicht mit genügender Genauigkeit ermittelt werden können, bietet sich die indirekte Bestimmung über Paßpunkte an, von denen die Bild- und Objektkoordinaten bekannt sein müssen. Ihre Bildkoordinaten müssen visuell ermittelt und den entsprechenden Objektkoordinaten zugeordnet werden, indem man sie interaktiv in überlappenden Bildern lokalisiert und einmißt. Zusätzlich werden in den Bildern Verknüpfungspunkte, sogenannte „Tiepoints“ bestimmt, um die Bilder untereinander in Beziehung zu bringen.

Die 6 Parameter der äußeren Orientierung sind: Die Objektkoordinaten des Aufnahmeortes $O(X_0, Y_0, Z_0)$ sowie 3 Drehungen der Bilder (Längsneigung ξ , Querneigung ω , und Kantung η) mit O = Projektionszentrum, P = Objektpunkt, P' = Bildpunkt, H = Bildhauptpunkt, M = Bildmittelpunkt, c = Kamerakonstante (siehe Abbildung 2.9) [KW94].

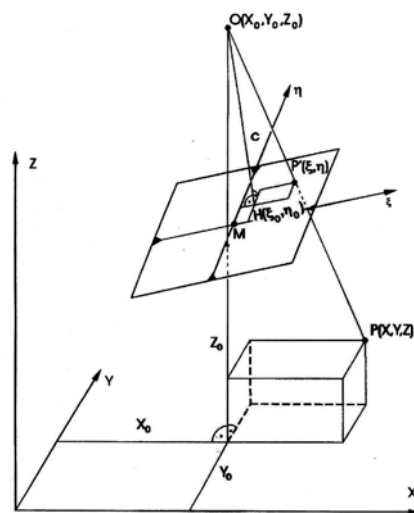


Abbildung 2.9: Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten [KW94]

Die äußere Orientierung kann unterschieden werden in eine relative und eine absolute Orientierung.

Die *relative Orientierung* rekonstruiert die gegenseitige räumliche Lage der Strahlenbündel von Bildpaaren. Wenn dies erreicht ist, schneiden sich alle einander entsprechenden (homologen) Projektionsstrahlen und bilden in ihrer Gesamtheit ein räumliches (Stereo-) Modell des betreffenden Geländeabschnittes. Im mathematischen Sinne ist das Bildpaar nach der relativen Orientierung dem Gelände ähnlich, weist also dieselbe Form auf, allerdings ist der Maßstab noch zufällig. Außerdem nimmt das Modell eine beliebige, meist leicht schräge Lage im Raum ein. Deshalb wird das Stereomodell schließlich durch die *absolute Orientierung* mit Hilfe von Paßpunkten auf den angestrebten Maßstab und in die richtige Lage im Raum gebracht [Alb01].

Um die Bildkoordinaten in ein geographisches Bezugssystem zu überführen, kommt bei der absoluten Orientierung dem Einmessen von Paßpunkten eine besondere Bedeutung zu. Von der Genauigkeit der Objektkoordinaten und der Bildkoordinaten hängt die Genauigkeit der äußeren Orientierung entscheidend ab. Als Paßpunkte können vor dem Bildflug markierte Punkte und gut zu identifizierende natürliche Punkte genutzt werden. Die höchste Genauigkeit erhält man mit Signalpunkten wie beispielsweise der Markierung eines großen

weißen Kreuzes auf der Strasse, dessen Koordinaten man vor Ort vermessen kann. Das Ergebnis wird um so genauer, wenn der Signalpunkt nur aus den Koordinaten x und y besteht, da dann keine Verzerrung oder windbedingtes Wegkippen wie bei Baumspitzen, auftreten kann. Die Breite und Farbe der Paßpunkte sollte in Abhängigkeit vom Kontrast der Umgebung und der Flughöhe des Bildflugs gewählt werden [KW94]. Natürliche Paßpunkte müssen auf dem Bild eindeutig zu identifizieren sein. Linienförmige Kreuzungen, Kanaldeckel, Gebäude- oder Feldecken bieten sich bei großen Maßstäben an.

Die Verteilung und Anzahl der Paßpunkte auf einem Bild ist abhängig von der Anzahl und Lage der Bilder, die orientiert werden sollen (Einzelbild, Zweibild, Streifen oder Blöcke). Es gilt jedoch, ein Minimum von drei Paßpunkten pro Bildverband einzubeziehen, die nicht linear angeordnet sein sollten. Vergleichbar mit einem Tisch, der auch auf mindestens drei Füßen stehen muß, sollte das Bild möglichst in jeder Ecke „Halt“ haben. Mehr Kontrollpunkte als minimal erforderlich erhöhen die Genauigkeit bzw. den Halt. In der Regel mißt man Nester von zwei Paßpunkten, um Fehlmessungen identifizieren zu können. Nach [KW94] sollten bei Blockverbänden die Paßpunkte auf dem Blockrand liegen; er zieht aus Untersuchungen zur Lagegenauigkeit der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen den Schluß, daß Paßpunkte im Blockinneren keine nennenswerte Genauigkeitssteigerung bringen. Zur Genauigkeitssteigerung kann der Blockrand aber dichter mit Paßpunkten besetzt werden.

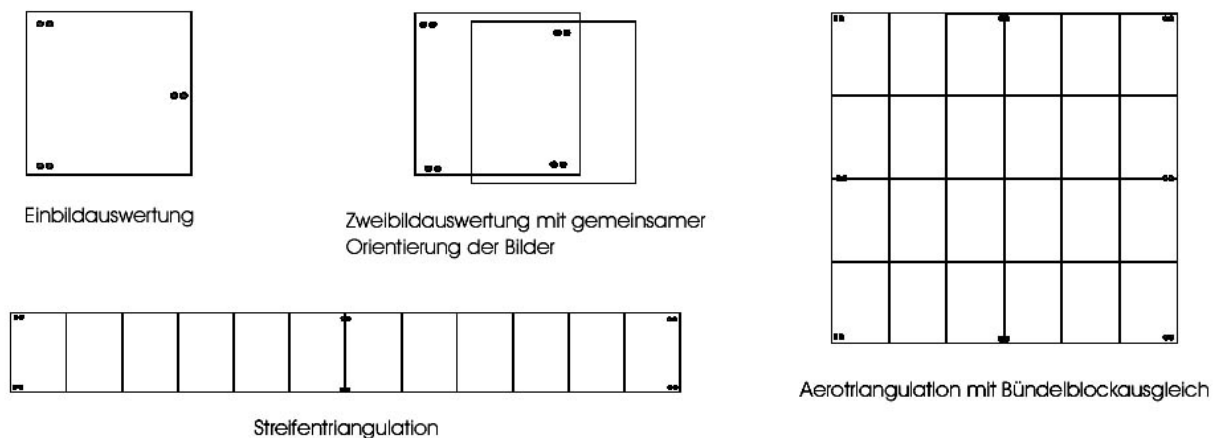


Abbildung 2.10: Optimale Verteilung von Paßpunkten [FSL01]

Am besten sind auf dem Luftbild streng geometrische Formen oder Markierungen wie Straßenmarkierungen oder Kanaldeckel auszumachen. Daher bietet es sich an, bereits vor der Befliegung Signalmarkierungen auf dem Erdboden anzufertigen, die dann bei der äußeren Orientierung als Paßpunkte verwendet werden können.

Die Genauigkeit der Paßpunkte errechnet sich nach [KW94] in Abhängigkeit von Bildmaßstab, Aufnahmehöhe sowie einer sogenannten „Definitionsunsicherheit“. Die Definitionsgenauigkeit natürlicher Objekte lautet dabei wie folgt:

Tabelle 2.1: Definitionsgenauigkeit natürlicher Objekte [KW94]

| Punktart | Definitionsunsicherheit der Lage | Definitionsunsicherheit der Höhe |
|--|---|---|
| Haus- und Zaunecken | 7-12 cm | 8-15 cm |
| Kanaldeckel oder Fahrbahnmarkierungen | 4-6 cm | 1-3 cm |
| Feldecken | 20-100 cm | 10-20 cm |
| Sträucher, Bäume | 20-100 cm | 20-100 cm |

3.) Vertikale und horizontale Genauigkeit

Die absolute vertikale und horizontale Genauigkeit setzt sich folgendermaßen zusammen:

- Geometrische Lagefehler beim Scannen
- Relative horizontale und vertikale Streifengenauigkeit
- Definitionssicherheit natürlicher Paßpunkte
- Lagefehler beim Einmessen der Paßpunkte

Nach [FSL01] kann der scannerbedingte Lagefehler mit 1μ angenommen werden. Demnach ergeben sich für die relative horizontale Genauigkeit im Streifenmodell folgende Gleichungen:

$$\sigma_{S,L} = \frac{\sqrt{(m_B * 0,000006)^2 + d_n^2 * \sigma_S}}{\sigma_M} + (F_S * m_B) + F_L \quad (2.3)$$

mit:

$\sigma_{S,L}$ = Relative horizontale Genauigkeit im Streifen in Meter

m_B = Bildmaßstab

σ_S / σ_M = Korrekturfaktor für Streifenmodell

F_S = Geometrischer Fehler des Scanners in Meter

F_L = Lagefehler der Paßpunkte aus Meßungenauigkeit

d_n = Definitionsunsicherheit der Lage in Meter, wobei

$$d_n = d_p * A * m_B \quad (2.4)$$

mit:

d_p = Definitionsunsicherheit in Pixel, wobei dafür eine 1/3 Pixelgröße angenommen wird [FSL01]

A = Digitalisierungsintervall in Meter

m_B = Bildmaßstab

Für die relative vertikale Genauigkeit im Streifenmodell ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\sigma_{S,Z} = \frac{\sqrt{(S_A * 0,00006)^2 + d_z^2 * \sigma_S}}{\sigma_M} + (F_S * m_B) + F_L \quad (2.5)$$

mit:

$\sigma_{S,Z}$ = Relative vertikale Genauigkeit im Streifen in Meter

S_A = Aufnahmeentfernung in Meter

σ_S / σ_M = Korrekturfaktor für Streifenmodell

F_S = Geometrischer Fehler des Scanners in Meter

F_L = Lagefehler der Paßpunkte aus Meßungenauigkeit

d_z = Definitionsunsicherheit der Höhe in Meter, wobei

$$d_n = d_p * A * m_B \quad (2.6)$$

mit:

d_p = Definitionsunsicherheit in Pixel, wobei dafür eine 1/3 Pixelgröße angenommen wird [FSL01]

A = Digitalisierungsintervall in Meter

m_B = Bildmaßstab

2.2.1.6 Automatisches Generieren des Geländemodells

Ein digitales Geländemodell gibt die Erdoberfläche nach Lage und Höhe durch eine Vielzahl von Punkten in digitaler Form wieder. Viele photogrammetrische Arbeitsstationen bieten die Möglichkeit des automatischen Erzeugens eines digitalen Geländebildes aus Stereobildern an. Der Vorgang ist jedoch nach wie vor teilweise interaktiv und sehr arbeitsaufwendig, möchte man zu einer genauen Lösung kommen.

Zur Erzeugung digitaler Geländemodelle wird in einem Gitter mit regelmäßigem Punktabstand (Grid) die Stereoparallaxe an jedem Knotenpunkt gemessen. Die Knotenpunkte bestimmen sich wie schon bei der Erstellung des Stereomodells nach dem „*area based matching*“-Prinzip, wobei das System mit Hilfe der Koordinaten die Punkte über eine Ähnlichkeitstransformation der Pixelwerte untereinander herstellt. In hochauflösenden Geländemodellen sollten Geländekanten und markante Höhenpunkte mitberücksichtigt werden. In der Regel kann man diesen Ansprüchen mit einem regelmäßigen Gitter (GRID) nicht gerecht werden. Um auch linienförmig Objekte, die nicht auf den Gitterkreuzungen liegen, als dreidimensionale Daten aufzeichnen zu können, muß ein anderes Datenmodell benutzt werden: das Triangulated Irregular Network (TIN).

Üblicherweise erfolgt der Prozeß der Geländegenerierung zunächst in einem automatischen Modus „*Automatic Terrain Extraction*“ (ATE). Dabei hat man die Wahl zwischen zwei Methoden, die das Programm bei der Bild-Korrelation benutzen kann: die adaptive oder die nicht-adaptive. Bei der adaptiven Methode handelt es sich um eine Mischmethode, die auf Gelände angewandt wird, das seine Charakteristika über die verschiedenen Bilder des Bildverbandes ändert, also etwa sowohl flach als auch hügelig oder steil ist. Bei der nicht-adaptiven Methode werden Parameter wie die Hangneigung vom Operator selbst bestimmt. Dieses Verfahren eignet sich vor allem dann, wenn es sich um homogenes Gelände handelt. In der Regel werden mit der adaptiven Methode die besseren Ergebnisse erzielt [Soc00].

Weiterhin ist es möglich, eine Glättung auf das Gelände rechnen zu lassen, welches starke Höhengsprünge abschwächt und Unebenheiten eliminiert. Eine Glättung von unebenen Bereichen des zu erstellenden Geländes aufgrund von Fehlinterpretationen des Korrelationsmodells könnte zwar wünschenswert sein, jedoch bietet der automatische Modus keine Kontrolle darüber, ob es sich um „wahre“ Unebenheiten oder die erwähnten Fehlinterpretationen des Korrelationsmodells handelt. Diese Stellen müssen dann später interaktiv beseitigt werden. Daneben kann ein Filter zur Eliminierung von Bäumen und Häusern eingesetzt werden. Diese Methode findet Anwendung, wenn das angestrebte Geländemodell ein DGM darstellen soll [Soc00] [Pau05].

Um die Auflösung des Geländes festzulegen, muß der Stützstellenabstand definiert werden. Dieser beschreibt den Abstand zwischen zwei Punkten, an dem ein Höhenpunkt generiert wird.

Die ATE bestimmt die Höhen durch Messung der X-Parallaxe, also der Verschiebung eines Punktes in einem Bild relativ zur Position desselben Punktes in einem anderen Bild. Dabei wird ein iterativer Algorithmus eingesetzt, der bei einem Verkleinerungslevel kleinen Maßstabes und weiten Stützstellenabstandes beginnt und im weiteren Verlauf beide Parameter

erhöht bis sowohl das 1:1 Verkleinerungslevel als auch der gewünschte Stützstellenabstand erreicht sind [Soc00].

2.2.2 Erfassung über Radarsysteme

Die Radartechnik wurde während des zweiten Weltkrieges erstmals zur Ortung und Verfolgung von Zielobjekten wie Schiffen und Flugzeugen eingesetzt. Das Wort „RADAR“ stammt aus dem Englischen und ist eine Abkürzung aus „*Radio Detection And Ranging*“, dem „Aufspüren und Vermessen mittels Radiowellen“ oder kurz „*Funkortung*“ [KS88] [Pau05].

Radarsysteme lassen sich in aktive und passive Systeme unterteilen. Bei aktiven Radarsystemen wird die verwendete Strahlung vom Sensor selbst erzeugt, während bei passiven Radarsystemen die von der Erde emittierte Eigenwärmestrahlung registriert wird [KS88] [Alb01].

Passive Radarsysteme sind mittlerweile kaum noch im Einsatz, wobei sie jüngst im militärischen Bereich bei der Ortung sogenannter Stealth-Fahrzeuge oder Stealth-Flugzeuge eine neue Anwendung gefunden haben [Pau05].

Als eine der wesentlichen Quellen für digitale Höhenmodelle hat sich in den letzten Jahren die Auswertung von aktiven SAR Interferogrammen herausgebildet. Die Wetterunabhängigkeit des Synthetic Aperture Radars und seine Einsatzmöglichkeiten, sowohl von einer Flugzeug- als auch einer Satellitenplattform aus, haben dieses Verfahren zu einer bevorzugten Methode der Fernerkundung werden lassen [May01].

2.2.2.1 Eigenschaften der Radarstrahlung

Radarsysteme, wie sie in der Fernerkundung Anwendung finden, stellen ein aktives System dar, d.h. die verwendete elektromagnetische Strahlung wird vom Aufnahmesystem selbst erzeugt. Dabei handelt es sich stets um Mikrowellenstrahlung mit einer bestimmten Frequenz im Bereich von etwa 1 bis 100cm Wellenlänge [Alb01].

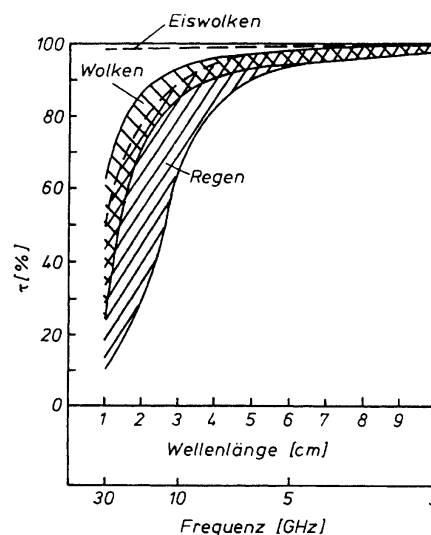


Abbildung 2.11: Transmissionsgrad der Atmosphäre für Mikrowellen [KS88]

Da der Transmissionsgrad (τ) der Atmosphäre für Mikrowellenstrahlung sehr groß ist, erlaubt Radar einen Einsatz unabhängig von Wetter und Tageszeit, indem es aufgrund seiner Wellenlänge, Wolken, Dunst, Rauch und Schnee durchdringt (vgl. Abbildung 2.11). Somit können Mikrowellen-Fernerkundungssysteme bei fast jedem Wetter eingesetzt werden, woraus sich ein unschätzbare Vorteil gegenüber Systemen im optischen Spektralbereich ergibt [KS88]. Lediglich bei starkem Regen kann eine Beeinflussung stattfinden [San98].

Die Wellenlänge bzw. die Frequenz der verwendeten Mikrowellenstrahlung wird durch die technischen Einzelheiten des Systems definiert. Weit verbreitet ist in diesem Zusammenhang die Kennzeichnung einzelner Wellenlängenbereiche durch Buchstaben, ohne daß es diesbezüglich eine einheitliche Festlegung gäbe. Die Unterscheidung der Frequenzbänder ist deshalb wichtig, weil die Wechselwirkung zwischen der Strahlung und den Materialien an der Erdoberfläche in den einzelnen Wellenlängenbereichen sehr unterschiedlich ist. Am Häufigsten werden in der Fernerkundung die in Tabelle 2.2 dargestellten Frequenzbereiche benutzt [Alb01].

Tabelle 2.2: Frequenzbereiche der Radartechnologie [Alb01]

| Frequenzband | Wellenlänge (λ) | Frequenz (f) |
|---------------------|---|----------------------------------|
| Ka-Band | 0,7 – 1 cm | 30 – 40 GHz |
| X-Band | 2,4 – 4,5 cm | 7 – 12 GHz |
| C-Band | 4,5 – 7,5 cm | 4 – 7 GHz |
| L-Band | 15 – 30 cm | 1 – 2 GHz |
| P-Band | 60 – 300 cm | 0,2 – 0,5 GHz |

Die Eindringtiefe von Mikrowellen in die Geländeoberfläche ist im Allgemeinen wesentlich größer als die Eindringtiefe von optischer Strahlung. In Abhängigkeit von Wellenlänge und Einfallrichtung der Strahlung sowie von Eigenschaften der Geländeoberfläche erhält man mit Mikrowellen Informationen über eine oberflächennahen Schicht von einigen Millimetern bis einigen Metern Dicke. Insbesondere können Mikrowellen teilweise auch eine Vegetationsdecke (z.B. Waldbestand) durchdringen [KS88].

Je größer die Wellenlänge der Strahlung ist, desto tiefer dringt sie ein und desto stärker hängt das Reflektionssignal von der Volumenstreuung der oberflächennahen Materialschicht ab [Alb01]. Abbildung 2.12 zeigt eine schematische Darstellung der Eindringtiefe von Mikrowellen in Abhängigkeit von der Wellenlänge des verwendeten Radarsystems.

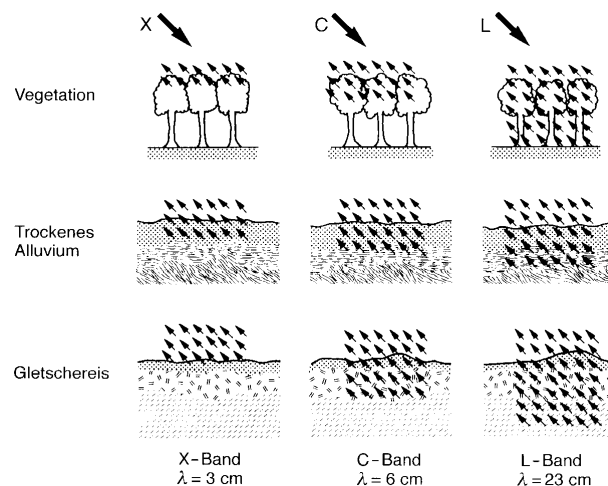


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung der Eindringtiefen von Mikrowellen [Alb01]

Die Emission wie auch die Reflektion von Mikrowellen werden vor allem von elektrischen Materialeigenschaften beeinflusst. Bei den meisten natürlichen Oberflächen (z.B. Boden, Vegetation) vermitteln Mikrowellen daher insbesondere Informationen über den Wassergehalt [KS88]. Materialien mit einer hohen Dielektrizitätskonstanten (feuchte Böden) reflektieren stark und die Strahlung dringt wenig in das Material ein. Mit abnehmender Dielektrizitätskonstanten (z.B. abnehmender Bodenfeuchte) wird auch das Reflektionsvermögen geringer und die Eindringtiefe nimmt zu. Ebenfalls tritt eine starke Reflektion an metallischen

Strukturen (z.B. Zäune, Masten von Hochspannungsleitungen u.ä.) auf. Das zu beobachtende Reflektionssignal hängt demnach von einer mehr oder weniger dicken Oberflächenschicht ab und vermag deshalb auch Informationen zu vermitteln, die beispielsweise mit optischen Sensoren nicht zu erfassen sind [Alb01].

Die Oberflächenrauigkeit hat ebenfalls einen großen Einfluß auf die Reflektionseigenschaft einer Oberfläche. Ist sie im Vergleich zur Wellenlänge der Strahlung gering, werden die Mikrowellen gespiegelt. Dies bedeutet, daß zum Empfänger praktisch kein Signal zurückkehrt, so daß solche Flächen im Radarbild dunkel erscheinen. Liegt die Rauigkeit dagegen in der Größenordnung der Wellenlänge, so wirkt die Fläche als diffuser Reflektor. Vielfach kommen Mischformen der Reflektion vor [Alb01] (siehe Abbildung 2.13).

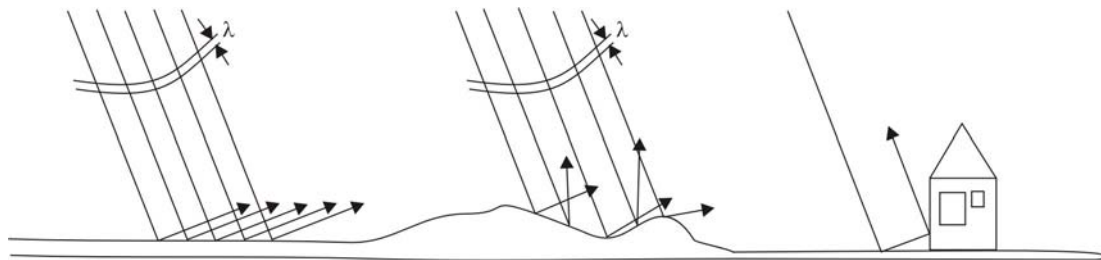


Abbildung 2.13: Reflektion von Mikrowellen an Oberflächen [Pau05] (nach Albertz)

Die jeweilige Oberflächenform führt dazu, daß manche Flächen der schräg einfallenden Mikrowellenflächenstrahlung zugewandt sind und deshalb stärker bestrahlt werden, während die abgewandten Flächen nur geringe Bestrahlung erfahren. Im Radarbild erscheint deshalb die Geländeoberfläche je nach ihrer Exposition in Bezug auf das Radar-System heller oder dunkler. Wenn eine systemabgewandte Fläche steiler geneigt ist als der Depressionswinkel, erhält sie überhaupt keine Strahlung. Das Radarbild zeigt dann völlig informationslose tiefe Schlagschatten, die man als Radarschatten bezeichnet [Alb01] (siehe Abbildung 2.14).

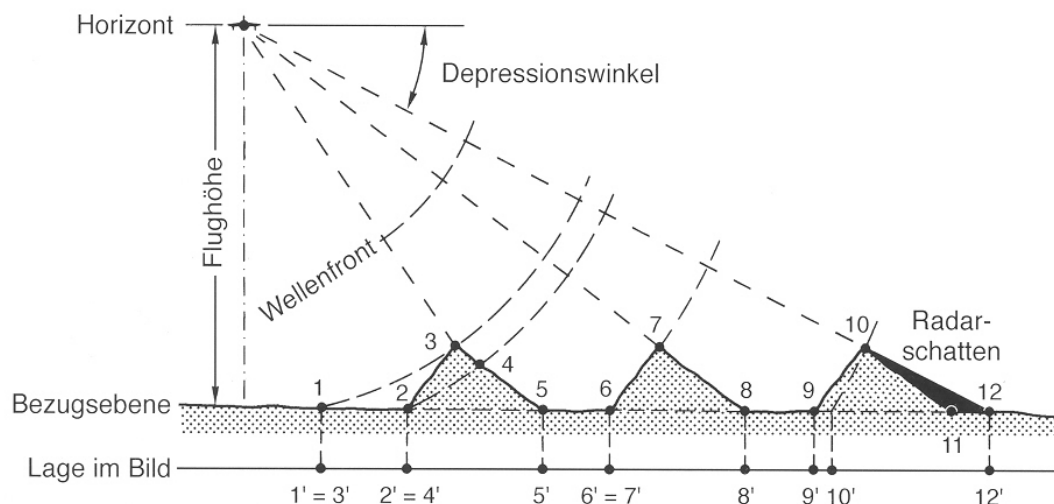


Abbildung 2.14: Depressionswinkel und Radarschatten [Alb01]

Als Depressionswinkel bezeichnet man in der Radartechnik den Winkel zwischen der Horizontebene des Aufnahmesystems und dem Strahl zum beobachteten Objekt. Seine Ergänzung zu 90° heißt auch Einfallswinkel (Incidence Angle). Er wirkt sich unmittelbar auf die Auflösung des Systems quer zur Flugrichtung aus und bestimmt die Bestrahlungsstärke der Geländeoberfläche. Außerdem steht er in einem engen Zusammenhang mit der Geometrie der Abbildung und der Möglichkeit, Stereobildstreifen aufzunehmen [Alb01].

Werden aufgrund von ungünstigen Oberflächenstrukturen oder Schlagschatten keine Informationen an den Empfänger zurückgesandt, entstehen informationsleere Datenlücken (*engl. Void*), die keine Aussagen über den vermessenen Geländeausschnitt zulassen [HFB05]. Nach [EC07] werden „*Voids*“ als Werte ohne Informationsgehalt bezeichnet, die sich über Landmassen befinden, aber keine Wassermasse darstellen. Diese Datenlücken können je nach Morphologie der Erdoberfläche eine erhebliche Ausdehnung besitzen [EC07].

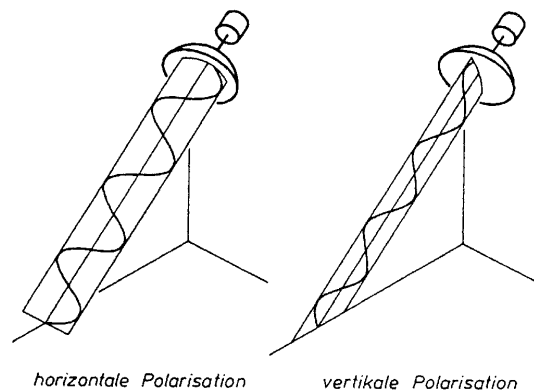


Abbildung 2.15: Polarisierung von Mikrowellen [KS88]

Wenn von einem Radarsystem ausgesendete Mikrowellen in nur einer ausgezeichneten Richtung schwingen, spricht man von Polarisation. Radarmikrowellen können sowohl horizontal (h) als auch vertikal (v) polarisiert sein (vgl. Abbildung 2.15). Beim Empfang des Rücklaufs kann das System wiederum auf horizontale oder vertikale Polarisation eingestellt sein. Dadurch sind vier Kombinationen der Polarisation ausgestrahlter und empfangener Mikrowellen möglich, nämlich: HH, VV, HV und VH [Ab01] [KS88].

2.2.2.2 Funktionsweise von Radarsystemen

Auf einem Flugzeug oder Satelliten bzw. Weltraumfähre wird ein kombinierter Radarsender und -empfänger mitgeführt, dessen Antenne schräg nach unten gerichtet ist. Sie ist so konstruiert, daß sich die in einem Bruchteil einer Sekunde ausgestrahlten Mikrowellen in einem sehr schmalen aber langen Raumwinkel hinaus, senkrecht zur Flugrichtung ausbreiten.

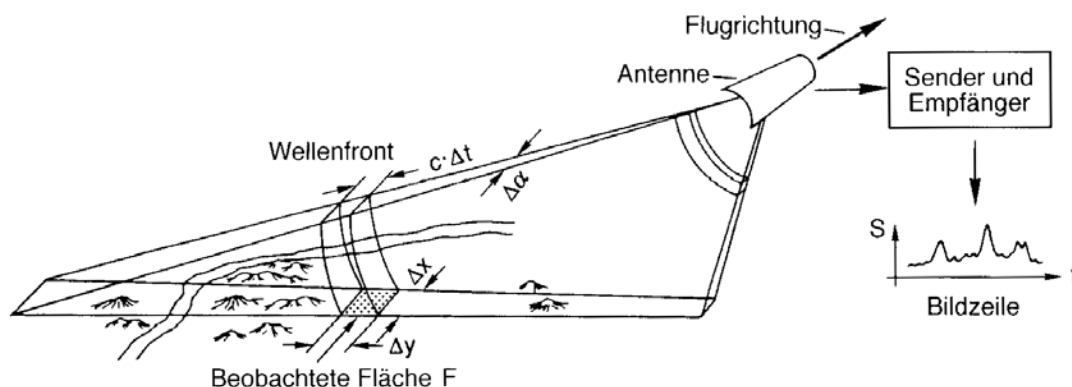


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung einer Radaraufnahme [Alb01]

Abbildung 2.16 zeigt die schematische Darstellung einer Radaraufnahme mit einem Seitensicht-Radar (Sidelooking Airborne Radar-SLAR). Zu einem bestimmten Zeitpunkt erreicht die Front der ausgesandten Wellen ein bestimmtes Flächenelement (F) des Geländes. Von diesem wird die Strahlung teilweise reflektiert und mehr oder weniger diffus in alle

Richtungen gestreut, so daß ein Teil des reflektierten Signals zurück in Richtung Antenne fällt, wo diese empfangen und registriert wird. Da die von den Mikrowellen bestrahlte Fläche über das Gelände hinwegwandert, können die Reflektionssignale von einem schmalen Geländestreifen nacheinander erfaßt und als Bildzeile aufgezeichnet werden. Durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeuges entsteht dann eine vollständige zeilenweise Bildaufzeichnung eines neben dem Flugzeug verlaufenden Geländestreifens [Alb01] [KS88]. Durch die zeitliche Verzögerung Δt wird die Laufzeit der reflektierten Strahlung in Höhendaten umgewandelt. Aus der gemessenen Signallaufzeit kann mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit c die Entfernung r zwischen Antenne und bestrahltem Geländestück t ermittelt werden [KS88]:

$$r = \frac{\Delta t * c}{2} \quad (2.7)$$

Die Intensität der Rückstrahlung wird schließlich in ein hochauflösendes Bild umgewandelt. Hierzu kann die empfangene Leistung P_r aus der Radargleichung nach Ulaby in [Kal03] wie folgt berechnet werden:

$$P_r = \frac{P_t * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{(4\pi)^3 + R^4} \quad (2.8)$$

wobei P_t die abgestrahlte Leistung und G die Antennengüte bezeichnet. Der Rückstreukoeffizient σ ist eine Funktion der Einfallsrichtung R , der Polarisierung λ , der Form des Streukörpers und seiner dielektrischen Eigenschaften (siehe auch Abbildung 2.17).

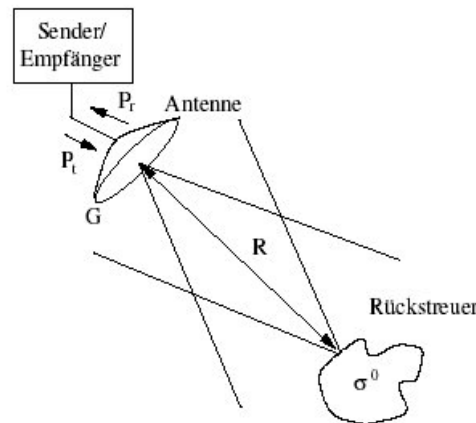


Abbildung 2.17: Geometrie des Radarprinzips [Kal03]

[Hei04] berücksichtigt in seiner Gleichung noch den zusätzlichen Faktor L_{ges} für alle Verluste, die zum Beispiel durch die Geräteauslegung und Signalverarbeitung auf dem Sende- und Empfangsweg entstehen.

$$P_r = \frac{P_t * G^2 * \lambda^2 * \sigma}{(4\pi)^3 + R^4 * L_{ges}} \quad (2.9)$$

Bei diesem Meßvorgang ist die Größe der aufgezeichneten Fläche F maßgeblich vom Winkel $\Delta\alpha$ abhängig, unter dem die Antenne abstrahlt und der mit zunehmender Entfernung anwächst. Die keulenförmige Abstrahlcharakteristik ist eine Funktion ihrer Baulänge (Abbildung 2.16). Je kürzer die Antenne, desto geringer ist der räumliche Abstrahlwinkel und damit die Auflösung. Ein System dieser Art wird als System mit Realer Apertur bezeichnet, welches sich nur für geringe Flughöhen, bei denen die Entfernung zwischen Antenne und

Gelände nicht zu groß ist, eignet [Alb01]. Wollte man beispielsweise bei einer Entfernung von 800 km zum Objekt und einer Wellenlänge von 5065 cm eine Auflösung in Flugrichtung (Azimutauflösung) von 5 Metern erreichen, so müßte die eingesetzte Antenne 8 km lang sein [Hei04].

Um nun den räumlichen Auflösungswinkel zu vergrößern, was insbesondere bei Aufnahmen von Radarbildern aus dem Orbit notwendig ist, bedient man sich einer synthetischen Apertur, dem sogenannten *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Dabei wird eine kurze Antenne verwendet, welche auf einer gleichbleibenden Flugbahn die Mikrowellenimpulse mit einem breiten Öffnungswinkel γ abstrahlt. Allerdings werden während des Fluges die einzelnen Geländepunkte wiederholt bestrahlt (Abbildung 2.18). Schließlich werden die mehrfach empfangenen Reflektionssignale eines bestimmten Geländepunktes in komplexer Weise miteinander korreliert. Bei der Verarbeitung können die Daten jedoch so behandelt werden, als würden sie von einzelnen Elementen eines sehr langen Antennensystems stammen. Durch diesen Vorgang lassen sich Bilddaten mit hoher geometrischer Auflösung ableiten. Je weiter ein Objekt von der Antenne entfernt ist, um so häufiger wird es vom Sensor erfaßt und um so länger erscheint die synthetische Antenne [Alb01] [KS88].

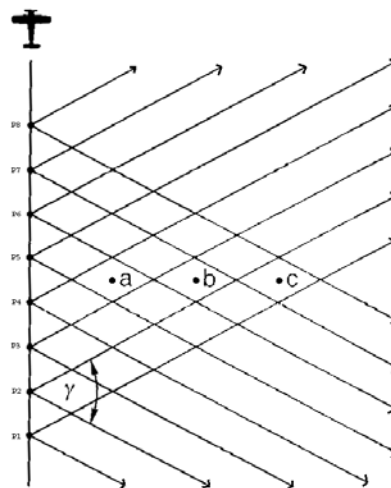


Abbildung 2.18: SAR- Wirkungsweise [Alb01]

Aus Abbildung 2.18 wird ersichtlich, daß zum Sensor nahe gelegene Punkte weitaus weniger erfaßt werden (Punkt a = 2mal) als weiter entfernte (Punkt c = 6mal).

Eine Voraussetzung für die Realisierbarkeit des Prinzips der synthetischen Apertur ist die Aufzeichnung der Phase der eintreffenden Strahlung und die Vergleichbarkeit der an den verschiedenen Antennenpositionen registrierten Phase. Es muß sich um kohärente Strahlung handeln, was bedeutet, daß deren Phasenbeziehungen über längere Strecken und Zeiträume konstant bleiben. Um diesen Effekt zu beschreiben, wird auch oft vom sogenannten „Doppler Effekt“ gesprochen. Dabei werden die Radar-Signale als Funktion der Zeit betrachtet [KS88]. Doppler-Effekt bedeutet, daß sich die Frequenz des Signals in Abhängigkeit von der Relativ-Geschwindigkeit ändert. Diese ergibt sich aus den Geschwindigkeitsvektoren von Antenne und Objekt. Die Reflexionssignale zweier Objekte A und B in gleicher Entfernung aber unter verschiedenen Winkeln, treffen zur selben Zeit am Empfänger ein. Sie haben aber unterschiedliche Dopplerverschiebungen, da sich die Relativ-Geschwindigkeiten der Objekte gegenüber der Antenne unterscheiden. Die beiden Signale, die zur selben Zeit am Empfänger eintreffen, können durch Auswertung des Frequenzspektrums in Azimut-Richtung unterschieden werden [Kra03].

Das konventionelle SAR-Verfahren ist jedoch auch nicht frei von systemimmanenten Nachteilen. So können verschiedene Punkte der erfaßten Oberfläche im Bild nicht unter-

schieden werden, wenn sie scheinbar gleich weit vom Sensor entfernt sind. Somit sind einem SAR bei der Generierung von Höheninformationen Grenzen gesetzt. Um diese zu umgehen, kommt das sogenannte Interferometrische SAR (InSAR) zum Einsatz, welches im Folgenden genauer beschrieben wird.

2.2.2.3 Geländegenerierung aus Radarsignalen

Die Generierung von digitalen Höhenmodellen mit Radarsystemen ist besonders effizient, da die Aufnahmen unabhängig von den äußeren Wetterbedingungen durchgeführt werden können. Ebenfalls von Vorteil ist, daß Radarsysteme sich auf weltraumbetriebenen Trägern anwenden lassen. Hierdurch wird es möglich, einheitliche Datensätze von großflächigen Gebieten, sogar mit globaler Abdeckung generieren zu können.

Ähnlich wie bei der Generierung von digitalen Geländemodellen mit photogrammetrischen Methoden wird auch hier mit einem Stereoeffekt gearbeitet, welcher eine räumliche Interpretation von Bildern erlaubt. Diese Technik wird bei Radarmessungen durch den Einsatz von Interferometrischen SAR Systemen ermöglicht.

Während bei stereoskopischen Auswertesystemen versucht wird, die Parallaxe durch direkte Messung der Weglängen zu bestimmen, wird beim interferometrischen SAR die Kohärenz des Signals ausgenutzt sowie die Tatsache, daß die Phase einer mono-chromatischen elektromagnetischen Welle sich proportional zur zurückgelegten Weglänge verhält [Pau05] (nach DLR).

Die Interferometrie nutzt die direkte Proportionalität der Phase zur zurückgelegten Weglänge der Mikrowelle. Es wird die Phasendifferenz der unterschiedlichen Weglängen berechnet [Hei04]. Diese Phasendifferenzen ergeben dann die genaue Höhe für jeden Pixelwert und sind somit die Basis für Digitale Gelände Modelle [San98].

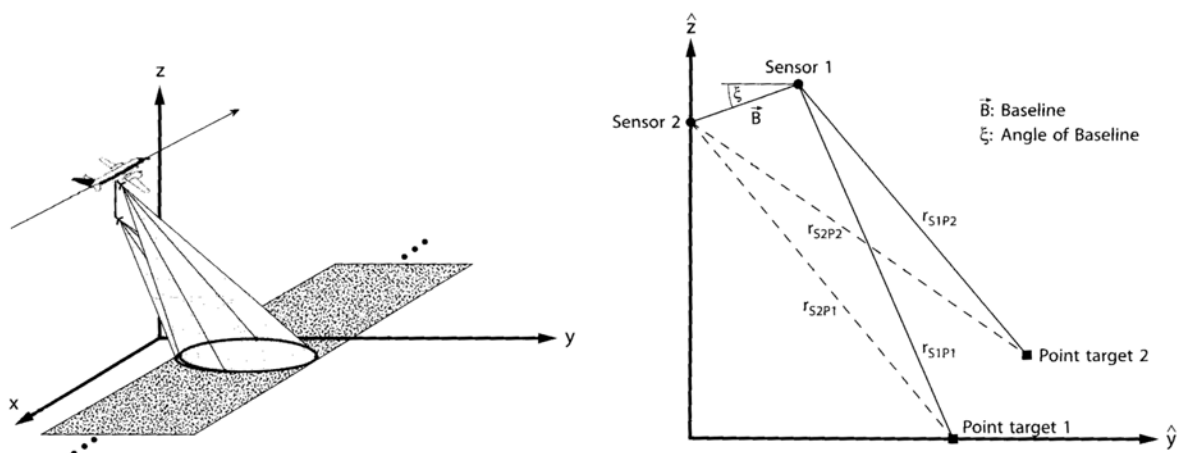


Abbildung 2.19: Interferometrisches Prinzip [Hei04]

Wie bereits erwähnt, bedarf es dieser Technologie, um potentielle Mehrdeutigkeiten aufzulösen. Dies wird durch den Einsatz eines zweiten Sensors (Sensor 2) im Abstand B (Basislinie) vom ersten Sensor (Sensor 1) erreicht, der eine dreidimensionale Darstellung ermöglicht. (Abbildung 2.19) [Hei04].

Interferometrische SAR Radarsysteme können je nach Systemeigenschaften in zwei unterschiedliche Gruppen aufgeteilt werden. Die erste Gruppe ist die der sogenannten „Single Pass Interferometer“, bei denen ein Radar mit zwei Antennen ausgerüstet ist wie z.B. während der SRTM-Mission [DLR99]. Hier ist nur ein Überflug notwendig, um eine interferometrische Aufnahme zu erzeugen (Abbildung 2.19). Die andere Gruppe ist die der „double-pass Interferometer“. Hier muß das Einzelradar einen zu beobachtenden Punkt der

Erde zweimal besuchen wie es z.B. im Rahmen der SRTM Vorgängermission SIR-C/X-SAR erfolgte [DLR99]. Der Schwachpunkt des zweitgenannten Verfahrens liegt unter anderem darin, daß sich die Gegebenheiten der Erdoberfläche (z.B. Jahreszeit) zwischen den zwei Überflügen ändern können und somit die Qualität und Genauigkeit des Datensatzes verschlechtert [San98].

2.2.3 Erfassung mit Laserscanning (LIDAR)

Eine weitere Methode zur Erfassung von Höhendaten ist die Vermessung mit Laserscannern. Diese Methode der flugzeuggestützten Laseraltimetrie wird auch *Airborne Laser Scanner* (ALS) genannt. Die Vermessungsmethode verwendet das Prinzip des LIDAR (Light Detection And Ranging). LIDAR beruht auf dem Abscannen der Erdoberfläche mit einem aktiven Lasersensor, der ein kohärentes und monochromatisches Licht in einer bestimmten Wellenlänge aussendet. Durch die Reflexion des Laserpulses an der Erdoberfläche wird der Puls zum Sensor zurückgeworfen. Dieser mißt die Laufzeit des Pulses von der Aussendung bis zum Empfang. Dadurch läßt sich die Distanz von der Erdoberfläche zum Sensor messen. Um schließlich die gemessenen Höhenwerte der Erdoberfläche räumlich zuordnen zu können, werden die Distanzinformationen geocodiert [Mor05] [May01].

2.2.3.1 Funktionsweise von Laserscannern

Zur Entfernungsermittlung mit Lasertechnik können je nach verwendetem System zwei verschiedene Meßverfahren zum Einsatz kommen: das Impulsverfahren oder das Phasenverfahren. Beim Impulsverfahren wird ein kurzer Laser-Lichtimpuls ausgesendet und die reflektierte Strahlung am Sensor registriert. Aus der Zeit, die zwischen der Aussendung und dem Empfang des Signals liegt, welches sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, läßt sich die doppelte Entfernung zwischen der Sende- und Empfangseinheit bestimmen. Somit ergibt sich für die einfache Entfernung [Loh07]:

$$R = \frac{1}{2} * c * t_L \quad (2.10)$$

mit: R = Entfernung
 t_L = Laufzeit
 c = Lichtgeschwindigkeit

Beim Phasenverfahren werden ähnlich wie beim Radar sinusförmige Wellen ausgesendet. Die Messung der Entfernung basiert auf dem Vergleich der Phasenlage der ausgesandten und rücklaufenden Strahlung. Ist die gemessene Distanz größer als die Wellenlänge, kann es zu einer Mehrdeutigkeit des Ergebnisses kommen, was allerdings durch die Nutzung mehrerer Sendefrequenzen verhindert werden kann. Schließlich kann die Entfernung zwischen Sender und reflektierter Oberfläche unter Verwendung des Phasenverfahrens nach [Loh07] wie folgt berechnet werden:

$$R = \frac{1}{2} * c * \frac{\Phi}{2\pi} * T + \sum T_{\text{ganz}} \quad (2.11)$$

mit: R = Entfernung
 Φ = Phasenverschiebung
 c = Lichtgeschwindigkeit
 T = Wellenlänge
 T_{ganz} = ganze Wellenlänge

Bei der Reflektion des Laserpulses an der Erdoberfläche wird oftmals aufgrund der Beschaffenheit der Erdoberfläche (z.B. Vegetationsbedeckung) nur ein Teil des Signals von der Oberfläche zurückgeworfen. Ein weiterer Teil durchdringt die Vegetation, wobei ständig Teile des Signals reflektiert werden. Schließlich erreicht das Signal den Boden, der nicht vom

Laserpuls durchdrungen werden kann und wird dort zum letzten Mal reflektiert. Der empfangende Sensor, welcher sich auf derselben Plattform befindet wie der emittierende Lasersender (Flugzeug), mißt die zurücklaufenden Reflektionen. Üblicherweise werden die Werte der ersten und letzten Reflektion des Lichtes aufgezeichnet (Abbildung 2.20) [Mor05].

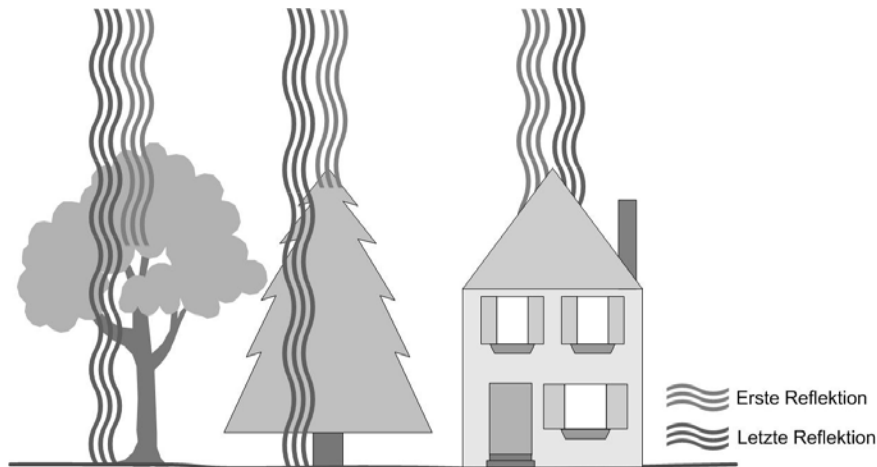


Abbildung 2.20: Erste und letzte Reflektion von Laserscannern

2.2.3.2 Geländegenerierung mit Laserscannern

Die durch die Reflektionen des Lasers gewonnenen Datensätze liegen schließlich in der Form einer komplexen 3D-Punktwolke vor (Abbildung 2.21), die noch keine äußere Orientierung besitzt. Somit muß in einem weiteren Schritt ein Bezug zu einem Koordinatensystem hergestellt werden. Für die korrekte Georeferenzierung der Meßpunkte ist es erforderlich, daß Position und Lage des Sensors (Flugzeuges) zum Zeitpunkt der Messung bekannt sind. Bei einem ALS wird dazu eine Kombination aus mindestens einem GPS-Empfänger sowie dem inertialen Navigationssystem (INS) verwendet [May01].



Abbildung 2.21: 3D-Punktwolke mit erster und letzter Reflektion

Die Verwendung eines zweiten GPS Empfängers, auch Differential GPS (DGPS) genannt, liefert hierbei wesentlich bessere Ergebnisse.

Beim DGPS wird zusätzlich eine Referenzstation eingesetzt, die dasselbe Signal der GPS-Satelliten empfängt wie der an Bord des Flugzeuges befindliche mobile GPS-Empfänger. Da die geographische Lage der Referenzstation mit sehr großer Genauigkeit bekannt ist, kann der Fehler der momentanen GPS-Ortsbestimmung festgestellt werden. Das heißt, die Station kann die eigentlich benötigte Zeit des Satellitensignals bis zum Erreichen der Referenzstation mit der tatsächlich verbrauchten Zeit vergleichen und über die Bestimmung der Differenz den Fehler der Laufzeit des Signals ermitteln. Schließlich kann die bekannte Abweichung zur Korrektur der GPS-Signale des mobilen GPS-Empfängers (Rover) verwendet werden. Der gemessene Entfernungsfehler zum Satelliten sowie dessen zeitliche Änderung werden für jeden empfangenen GPS-Satelliten bestimmt und somit der tatsächliche Lagefehler des aufgenommen Punktes korrigiert.

Eine synchrone Ermittlung der Meßwerte der einzelnen Sensoren bzw. eine Synchronisierung dieser in einem Post-Prozeß sind zur exakten Lagebestimmung unbedingt erforderlich. Aus den so gewonnenen Koordinaten und Höhenwerten der 3D-Punkte können schließlich die Höhenmodelle abgeleitet werden.

Durch die Unterscheidung zwischen erster und letzter Reflektion lassen sich recht einfach digitale Oberflächen- bzw. Geländemodelle ableiten. Wird beispielsweise ein DOM benötigt, bieten die Werte der ersten Reflektion eine gute Basis. Doch gilt es zu beachten, daß je nach Oberflächenart eine erste Reflektion unterhalb der wirklichen Oberfläche möglich ist (z.B. Laubwald in den Wintermonaten) und somit eine korrekte Abbildung nur bedingt erfolgen kann [Loh07] [Mor05].

Wird ein DGM gefordert, kann die letzte Reflektion recht gute Informationen liefern. Allerdings muß hier beachtet werden, daß die letzte Reflektion die vom Laserimpuls nichtdurchdringbare Oberfläche darstellt. Folglich befinden sich in einem solchen Datensatz unter anderem Gebäudeoberflächen, die in einem echten DGM nicht enthalten sein dürfen [Loh07] [Mor05].

Die Genauigkeiten eines flugzeuggestützten Laserscanners liegen je nach Flughöhe, Vermessungsgebiet und LIDAR-System für den Höhenwert bei 5-35 cm und die horizontale Lage bei ca. 30-50 cm [Inf05] [Swi07]. Diese Werte gelten idealerweise für vegetationslose Flächen mit keiner bis moderater Steigung. Mit zunehmender Geländeneigung nimmt die Genauigkeit der Meßsysteme ab. Dies liegt zum einen daran, daß Positionsfehler des GPS und Lagefehler des INS sich stärker auf die Meßgenauigkeit auswirken als in der Ebene. Zum anderen hat die Geländeneigung einen ungünstigen Einfluß auf die Divergenz des Laserstrahls [Loh07] [May01].

Neben der Erfassung von dreidimensionalen Koordinaten kann auch die Intensität des reflektierten Signals aufgezeichnet werden. Die Intensitäten stellen ähnlich einem Schwarz-weißfoto das Abbild der aufgenommenen Oberflächen als Graustufenbild dar.

2.2.4 Fehlertypen in Geländemodellen

Nach [RTC05a] können Fehler in Geländedatenbanken in drei verschiedene Klassen unterteilt werden:

Systematische Fehler:

Systematische Fehler sind regelmäßig auftretende und wiederkehrende Fehler, die ihre Ursache im Meß- bzw. Bearbeitungsprozeß haben, wobei jede Methode ihre spezifischen Fehler aufweist. Systematische Fehler sind meist durch eine Kalibrierung der Meßinstrumente oder die Verwendung eines geeigneten mathematischen Korrekturmodells zu beheben.

Fehlmessungen / Verfälschungen (Blunder):

Als Blunder werden üblicherweise leicht erkennbare relativ großflächige Fehler in Höhenmodellen bezeichnet. Ihre Ursache liegt oftmals in grundlegenden Fehlern während der Datenaufnahme. Dies kann beispielsweise durch fehlerhafte Referenzpunkte, falsch

abgelesene Meßwerte aber auch falsch durchgeführte Berechnungen entstehen. Eine Überprüfung mit Hilfe von Referenzdaten kann das Problem oft beheben.

Zufällige Fehler:

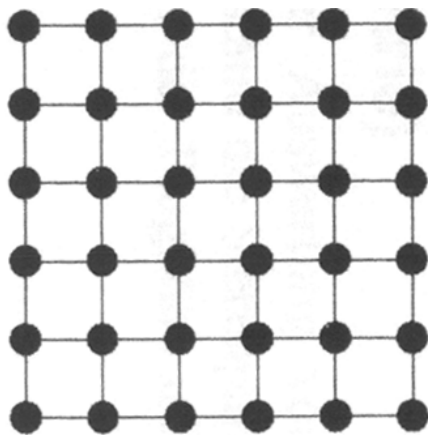
Die Gruppe der zufälligen Fehler stellt jene Werte dar, die nach Eliminierung des systematischen Fehlers sowie des Blunders noch Unkorrektheiten aufweisen. Die Größe und Verteilung des Fehlers unterliegt dem Zufall und kann durch geeignete statistische Auswerteverfahren quantifiziert werden.

2.3 Organisationsformen von digitalen Höhenmodellen

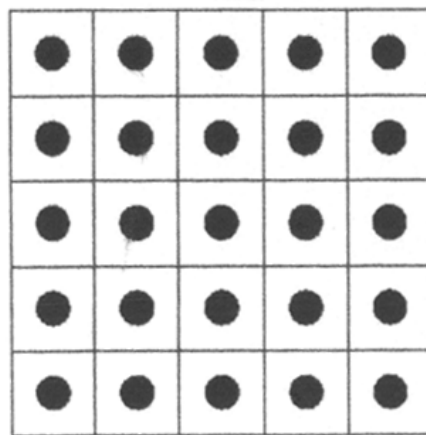
Höhenmodelle können auf verschiedene Weise dargestellt werden. Die häufigsten Formen der Geländedarstellung sind das reguläre Gitter (Grid), das irreguläre Gitter (TIN) sowie die Darstellung des Geländemodells durch Höhenlinien [May01].

2.3.1 Reguläre Gitter

Im allgemeinen bestehen reguläre Gitter, auch Rasterdaten oder engl. *Grid* genannt, aus quadratischen Zellen mit einem einheitlichen Stützstellenabstand. Solch ein Geländemodell gibt die Höhenwerte in einer regelmäßigen Matrix wieder (vgl. Abbildung 2.22).



a) Punkthöhe



b) mittlere Flächenhöhe

Abbildung 2.22: Darstellungsweisen von regulären Gittern [May01]

Die Anzahl von Spalten und Zeilen dieser Matrix sind über die Ausdehnung des dargestellten Bereichs und einem festgelegten Abstand in Länge und Breite für die Stützstellen festgelegt. Die Werte der Matrix repräsentieren je nach Modell entweder die Höhe an dem durch Längen- und Breitenwert bestimmten Punkt oder die gewichtete Höhe einer durch vier umliegende Punkte bestimmten Zelle.

Im Fall a.) bestimmen sich die horizontalen Koordinaten eines Höhenpunktes x_p, y_p durch folgende Gleichung, wobei x_u, y_u = Datenursprung, n, m = Punktindex und dx, dy = Stützstellenabstand sind:

$$x_p = x_u + n * dx \quad (2.12)$$

$$y_p = y_u + m * dy \quad (2.13)$$

Die Eckpunkte der Zelle in Fall b.) bestimmen sich analog, wobei die mittlere Position des Höhenpunktes x_{mp}, y_{mp} einer Zelle durch:

$$x_{mp} = x_u + (n + 0,5) * dx \quad (2.14)$$

$$y_{mp} = y_u + (m * 0,5) * dy \quad (2.15)$$

bestimmt ist [HG94] [May01].

Jedem Gitterpunkt wird ein Höhenwert zugeordnet. Höhenwerte zwischen zwei Punkten können durch Interpolationsverfahren wie z.B. der „Bilinear Interpolation“ oder der „Cubic Convolution“ bestimmt werden.

Die Genauigkeit eines digitalen Geländemodells, das durch ein reguläres Gitter dargestellt wird, steht im direkten Zusammenhang zu dem Abstand der Stützstellen, also der Pixel- bzw. Zellengröße. Jede Zelle wird durch einen Höhen- und Breitenwert gleichen Ausmaßes (Quadrat) definiert und ist Teil des Rasters, welches den Geländeabschnitt repräsentiert. Die Zellengröße, und somit die Genauigkeit des Rasters, kann je nach der geforderten Genauigkeit variiert werden, wobei der Speicherbedarf des Datenmodells berücksichtigt werden sollte (siehe Abbildung 2.23).

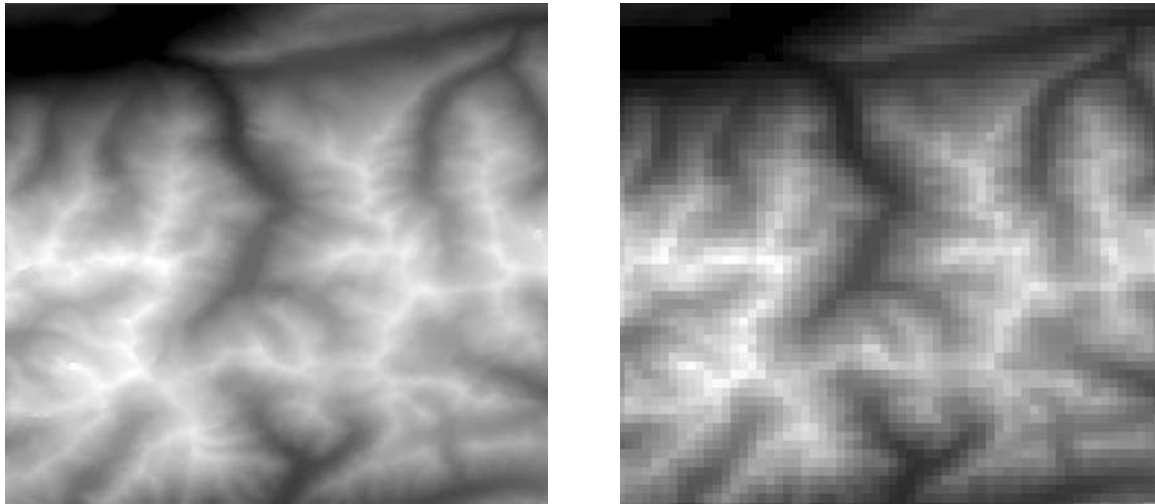


Abbildung 2.23: Auswirkung des Stützstellenabstands auf Raster-Höhendaten

Hinsichtlich eines effektiven Speicherns von Höheninformationen stellt ein Datenmodell, basierend auf einem regulären Gitter, eine ideale Lösung dar, da für jede Zelle lediglich der z-Wert (Höhenwert) benötigt wird. Die Lageinformationen (x-, y-Koordinaten der unteren linken Ecke des Rasters) werden für die gesamte Matrix in einem *Header* abgelegt, der ebenfalls die Informationen über die Anzahl der Zeilen und Spalten sowie der Zellengröße beinhaltet (siehe Abbildung 2.24). Mit diesen Informationen kann nun die Lage jedes Pixels ermittelt werden, ohne daß für jeden Punkt unter großem Speicheraufwand die gesamten x-, y- und z-Werte bereitgehalten werden müssen (vgl. [Esr04]).

```
ncols      1200
nrows      1200
xllcorner  11.0000
yllcorner  47.0000
cellsize    0.00083333
NODATA_value -9999
647 650 654 659 664 672 673 655 636 629 629 638 650 655 657 650 642 642 643 643 644 647 662
648 652 657 663 668 671 668 652 629 629 629 641 657 665 663 655 649 646 646 646 647 650 660
650 653 655 653 656 661 660 654 640 629 629 629 651 661 658 652 651 651 649 648 647 647 652
639 641 644 657 665 669 666 662 652 634 629 629 650 661 657 651 653 652 647 644 646 645 644
632 635 638 647 655 653 644 640 634 629 629 643 656 656 654 654 652 650 646 645 646 647 646
628 629 630 634 629 629 629 629 637 640 651 653 649 646 650 655 662 662 658 650 647 645
626 626 627 625 623 629 629 641 647 651 647 647 647 648 653 654 656 661 661 660 658 651 648
626 626 625 625 625 624 629 637 640 643 646 646 648 654 655 654 657 658 658 656 650 650 650
625 625 626 628 625 627 631 637 643 646 648 644 646 655 658 658 657 658 659 656 653 653 651
626 624 625 627 627 631 634 637 645 645 645 645 648 657 659 659 662 665 664 663 664 662 662
626 627 626 626 626 631 634 639 644 642 644 648 648 656 658 661 666 668 668 668 670 667 662
```

Abbildung 2.24: Beispiel eines regulären Gittermodells als ASCII-Datei

Als Format zur Beschreibung von digitalen Höhendaten hat sich das ursprünglich militärische DTED (Digital Terrain Elevation Data)-Format der NIMA (National Imagery and Mapping Agency) - heute NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) - durchgesetzt. Diese

Datenspezifikation beschreibt, wie ein reguläres Gitter aufgebaut sein muß, damit es verschiedene Waffen- und Trainingssysteme, wie aber auch kartographische Anwendungen unterstützt. Die DTED-Spezifikation ist mittlerweile über die Grenzen der USA hinaus gebräuchlich und findet nun auch in den verschiedensten zivilen Anwendungen Gebrauch. Die verschiedenen Genauigkeitsstufen des DTED Formats definieren sich nach [NGA00] und [FAS07] wie folgt (Tabelle 2.3):

Tabelle 2.3:DTED Level [NGA00][FAS07]

| DTED Level | Stützstellenabstand [Grad] | Stützstellenabstand [m] | Reihen und Spalten | Kachel Größe |
|-------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 0 | 30 sec | ~1000 m | 120 x 120 | 1 x 1 Grad |
| 1 | 3.0 sec | ~100 m | 1200 x 1200 | 1 x 1 Grad |
| 2 | 1.0 sec | ~30 m | 3600 x 3600 | 1 x 1 Grad |
| 3 | 0.3333 sec | ~10 m | 900 x 900 | 5 x 5 Minuten |
| 4 | 0.1111 sec | ~ 3 m | 540 x 540 | 1 x 1 Minuten |
| 5 | 0.0370 sec | ~ 1 m | 810 x 810 | 30 x 30 Sekunden |

Während die DTED-Level 0-2 heute schon eine gängige Datenspezifikation darstellen [NGA00], sind die Klassifizierungen für DTED 3-5 nach [FAS07] als Vorschlag einer Unterteilung für künftige Geländedatenprodukte zu verstehen. Anforderungen an Genauigkeit sowie das Bezugssystem, die von der NIMA bzw. FAA an Höhendaten im DTED-Format 0-2 gemacht werden, sind Tabelle 2.4 zu entnehmen.

Tabelle 2.4:Genauigkeiten und Bezugssysteme DTED 0 - 2 [NGA00]

| DTED Level | Horizontales Datum | Vertikales Datum | Absolute Vertikale Genauigkeit (90% Linear Error) | Absolute horizontale Genauigkeit (90% Circular Error) |
|-------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|--|
| 0 | WGS84 | MSL (EGM96) | nicht angegeben | nicht angegeben |
| 1 | WGS84 | MSL (EGM96) | ≤ 30 Meter | ≤ 50 Meter |
| 2 | WGS84 | MSL (EGM96) | ≤ 18 Meter | ≤ 23 Meter |

2.3.2 Irreguläre Gitter (Dreiecksnetze)

Ein irreguläres Netzwerk, engl. „*Triangulated Irregular Network*“ (TIN) genannt, beschreibt einen Geländeabschnitt auf der Basis unregelmäßig verteilter Punkte, welche über ein Netzwerk von Dreiecken miteinander verbunden sind. Für jeden Knotenpunkt werden wie bei Vektordaten, die Lageinformationen mit Hilfe der x-, y-, und z-Werte abgelegt (vgl. Abbildung 2.25).



Abbildung 2.25: Beispiel eines irregulären Gitters (TIN)

Im Gegensatz zu einem regulären Gitter können irreguläre Netzwerke die reellen Meßwerte wiedergeben, da diese nicht in ein starres Raster gezwungen werden müssen. Dies hat den Vorteil, daß die Geländecharakteristik naturgetreu wiedergegeben werden kann. Oberflächen mit wenigen und geringen Sprüngen im Relief lassen sich unter Umständen als TIN mit einer geringeren Datenmenge darstellen als durch ein reguläres Gitter, da Höheninformationen nur an charakteristischen Punkten abgebildet werden müssen [Esr04] [May01].

Da die Triangulation einer Punktmenge P nicht eindeutig ist (für $P \in \mathbb{R}$ mit $P > 3$), werden Triangulationskriterien benötigt. Die am weitesten verbreitete Triangulierungsmethode ist die sogenannte Delaunay-Triangulation. In einer Delaunay-Triangulation erfüllen alle Dreiecke des Dreiecksnetzes die sogenannte Umkreisbedingung: Der Umkreis eines Dreiecks des Netzes darf keine weiteren Punkte der vorgegebenen Punktmenge enthalten. Dadurch weisen die Dreiecke des Netzes möglichst große Innenwinkel auf; mathematisch gesprochen wird „der kleinste Innenwinkel über alle Dreiecke maximiert“. Diese Eigenschaft ist sehr erwünscht, denn sie minimiert Rundungsfehler (Abbildung 2.26).

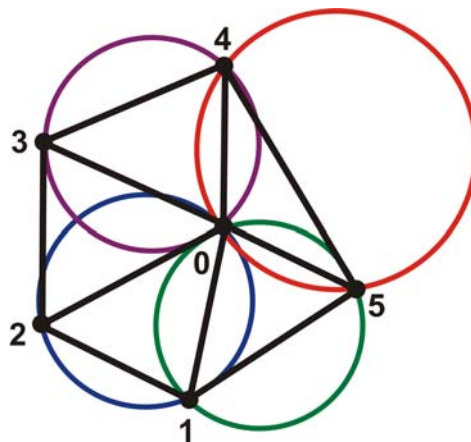


Abbildung 2.26: Triangulierung nach Delaunay

Die Delaunay-Triangulation ist nicht eindeutig falls auf einem Umkreis mehr als drei Punkte liegen. Der Anwender kann sich beliebig aussuchen, welche drei Punkte er zu einem Dreieck verbindet. Im dreidimensionalen Raum wird statt der Umkreisbedingung die analoge Umkugelbedingung verwendet [Wik06] [Hec94].

2.3.3 Höhenlinien

Höhenlinien, auch Isohypsen oder Höhenschichtlinien genannt, finden normaler Weise ihren Einsatz in der Kartographie, um in einer ebenen Abbildung des Geländes die Höheninformationen darzustellen. Hierzu werden in regelmäßigen Intervallen alle Punkte gleicher Höhe durch eine Kurve verbunden. Auch in der digitalen Datenverarbeitung ist diese Form der Geländedarstellung anzutreffen, gleichwohl sie hier eine eher untergeordnete Rolle spielt (Abbildung 2.27).

Durch ihre weite Verbreitung in gedruckten Karten stellt sie wohl die visuell eingängigste Form von Höheninformationen dar, birgt allerdings einige Nachteile in der Auswertung. In der Regel wird die absolute Höhe eines Punktes durch lineare Interpolation zwischen zwei benachbarten Höhenlinien berechnet. Allerdings erweist sich dies kritisch im Bereich ausgezeichneter Geländepunkte (Bergspitzen, Sattel- und Muldenpunkte) und Gebieten starker Gefällewechsel. Hier kann die lineare Interpolation nicht immer die gegebenen Verhältnisse wiedergeben und kann zu kritischen Ergebnissen führen [HG94] [May01].

Demnach gilt es, auch bei dieser Art von Geländemodell, unter Berücksichtigung der zu erwartenden Datenmenge, eine der Anwendung genügende Auflösung zu wählen.

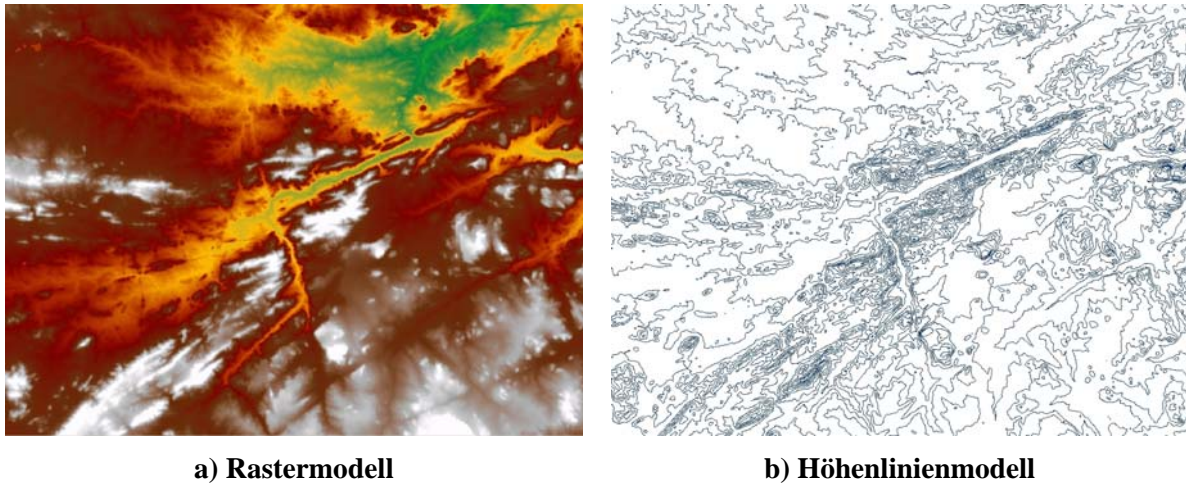


Abbildung 2.27: Vergleich Raster- und Höhenlinienmodell

2.4 Erdmodelle und Bezugssysteme

Um die Höhen- und Lageinformationen eines digitalen Geländemodells einer Position auf der Erdoberfläche zuzuweisen, müssen diese einem horizontalen wie auch vertikalen Bezugssystem zugeordnet werden.

Um ein einheitliches und hochgenaues Bezugssystem zu definieren, wurde durch den „Internationalen Dienst für Erdrotation und Referenzsysteme“ IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) das international vereinbarte, erdfeste, weltweite Bezugssystem von terrestrischen kartesischen Koordinaten ITRS (International Terrestrial Reference System) als gültiges Bezugssystem bestimmt. Dieses hat seinen Ursprung in dem Massenmittelpunkt der Erde, wobei die Z-Achse die mittlere Rotationsachse der Erde darstellt und die X-Achse in die 0°-Meridianebene (Greenwich) fällt. Als geometrische Rechen- und Abbildungsfläche wird das Rotationsellipsoid GRS80 herangezogen. Realisiert wird das ITRS mit Hilfe des ITRF (International Terrestrial Reference Frame), welches den Bezugsrahmen des ITRS darstellt. Das ITRF besteht aus weltweit verteilten Vermessungspunkten, deren Positionen und plattentektonischen Bewegungen das ITRS zahlenmäßig festlegen. Die ITRF-Punkte sind in die jeweilige kontinentale und nationale Landesvermessung eingebunden, so daß das ITRF auf europäischer Ebene durch das ETRF und auf nationaler (deutscher) Ebene durch das DREF wiedergegeben werden. Da die Erde keinen starren Körper darstellt, sondern Einflüsse der Plattentektonik zu dauernden Verschiebungen der Kontinente führen, ist es notwendig, diesen Faktor bei der Festlegung des Bezugssystems zu berücksichtigen. Aus diesem Grund werden „Jahreslösungen“ der Bezugsrahmen bestimmt. International hat derzeit das ITRF2000 Gültigkeit, wobei sich das ITRF2005 in Vorbereitung befindet [IER08]. Die derzeitige europäische Umsetzung erfolgt durch das ETRS89, welches von der EU als einheitliches Bezugssystem für Geodaten empfohlen wurde. Das ETRS89 kann als identisch zu dem in der Luftfahrt gebräuchlichen WGS84 Referenzsystem angesehen werden.

Da die Umsetzung der Vereinheitlichung der Bezugssysteme noch nicht vollständig abgeschlossen ist, kann eine Haltung von Geodaten in den unterschiedlichsten Referenzsystemen durch die Vermessungsämter erfolgen. Aus diesem Grund müssen sowohl bei der Datenfusion wie auch der Datenintegration die vorgefundenen Bezugssysteme sorgfältig geprüft werden. Insbesondere bei der Verwendung projizierter Koordinatensysteme kann es durch die Vielzahl der lokalen Bezugssysteme zu Komplikationen kommen.

Die Eigenschaften geodätischer Koordinatensysteme hinsichtlich ihrer horizontalen und vertikalen Handhabung werden im Folgenden genauer beschrieben.

2.4.1 Horizontale Bezugssysteme

Ein geodätisches Koordinatensystem wird sowohl durch das Datum, bei einem projizierten Koordinatensystem auch durch die Kartenprojektion, beschrieben.

Das Datum eines ebenen Bezugssystems basiert auf einer mathematischen Darstellung der Erdoberfläche. Es beschreibt die Form, die Ausrichtung, die Position und den Null-Meridian (Fundamentalpunkt) des Rotationsellipsoids (engl. *Spheroid*) eines Bezugssystems. Ein solches Bezugsellipsoid wird benötigt, um für die jeweiligen Bedürfnisse die am besten angepaßte geometrische Rechenfläche zu erhalten [Ash93].

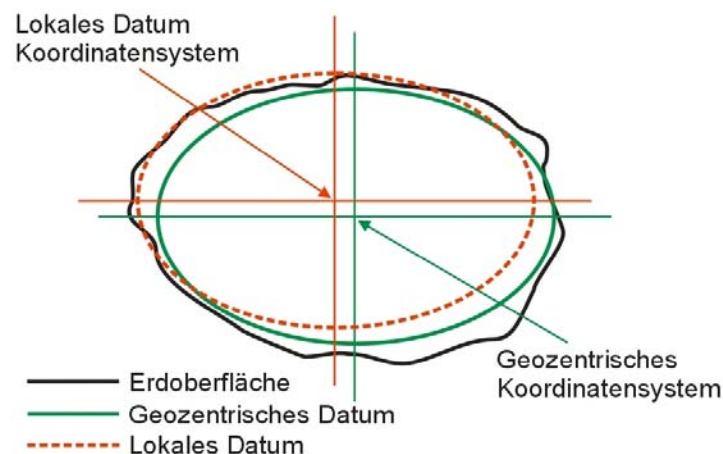


Abbildung 2.28: Lokales und geozentrisches Datum [Esr04]

Um den verschiedensten Ansprüchen der Geodäsie gerecht zu werden, existieren zum einen lokal gültige Koordinatensysteme (siehe Abbildung 2.28) wie z.B. das in Deutschland weit verbreitete Gauß-Krüger Koordinatensystem mit dem Bessel-Elipsoid, welches optimal die Form der Erdoberfläche in Deutschland wiedergibt. Zum anderen finden weltweit gültige Systeme, wie beispielsweise das in der Satellitengeodäsie verwendete geozentrische Koordinatensystem WGS84, Berücksichtigung. Im Gegensatz zu einem lokal gültigen Datum hat ein durch das Zentrum der Erde laufendes (geozentrisches) Datum keinen speziellen Ausgangspunkt (wie z.B. Potsdam /Deutsches Hauptdreiecksnetz), sondern stellt der Schwerpunkt des Ellipsoids des idealisierten Erdkörpers den Ursprung dar [Esr04].

Geodätische Koordinatensysteme können in geographische wie auch projizierte Koordinatensysteme unterschieden werden. Während das geographische Koordinatensystem die Krümmung des zugrundeliegenden Rotationsellipsoids beinhaltet, werden in einem projizierten Koordinatensystem diese Verzerrungen eliminiert. Um solche Entzerrungen zu ermöglichen, wurden verschiedene Formen der (Karten-) Projektionen entwickelt. Anhand der Methode der Projektion kann in der Kartographie die gekrümmte Oberfläche der (dreidimensionalen) Erde auf eine flache (zweidimensionale) Karte übertragen werden (siehe Abbildung 2.29).

Projektionsverfahren sind mathematische Ausdrücke, die Daten von einer geographischen Position (Breite und Länge) auf einem Spheroid (Rotationskörper) auf eine Ebene projizieren. Unweigerlich bringt dieser Vorgang eine Verzerrung von Form, Fläche und/oder Richtung der abgebildeten Objekte mit sich [Esr04].

Es sind über 200 verschiedene Projektionsmethoden bekannt. Als Hilfskörper kann man eine Ebene, einen Kegel, einen Zylinder oder einen anderen Körper benutzen. Durch die Projektion der Globuselemente auf diese Hilfsfläche erhält man ein flaches Abbild. Allerdings muß bei einem Kegel und Zylinder vorher die Oberfläche in die Ebene abgerollt werden.

Grundsätzlich kann man alle Kartenprojektionen nach der Art des genutzten Hilfskörpers unterscheiden [Ann01]. In der Kartographie ist die Zylinderprojektion weit verbreitet und findet z.B. in der Gauß-Krüger Projektion (transversale Mercatorprojektion) Anwendung. Abbildung 2.29 erklärt den Zusammenhang von Datum und Kartenprojektion in einem geodätischen Koordinatensystem.

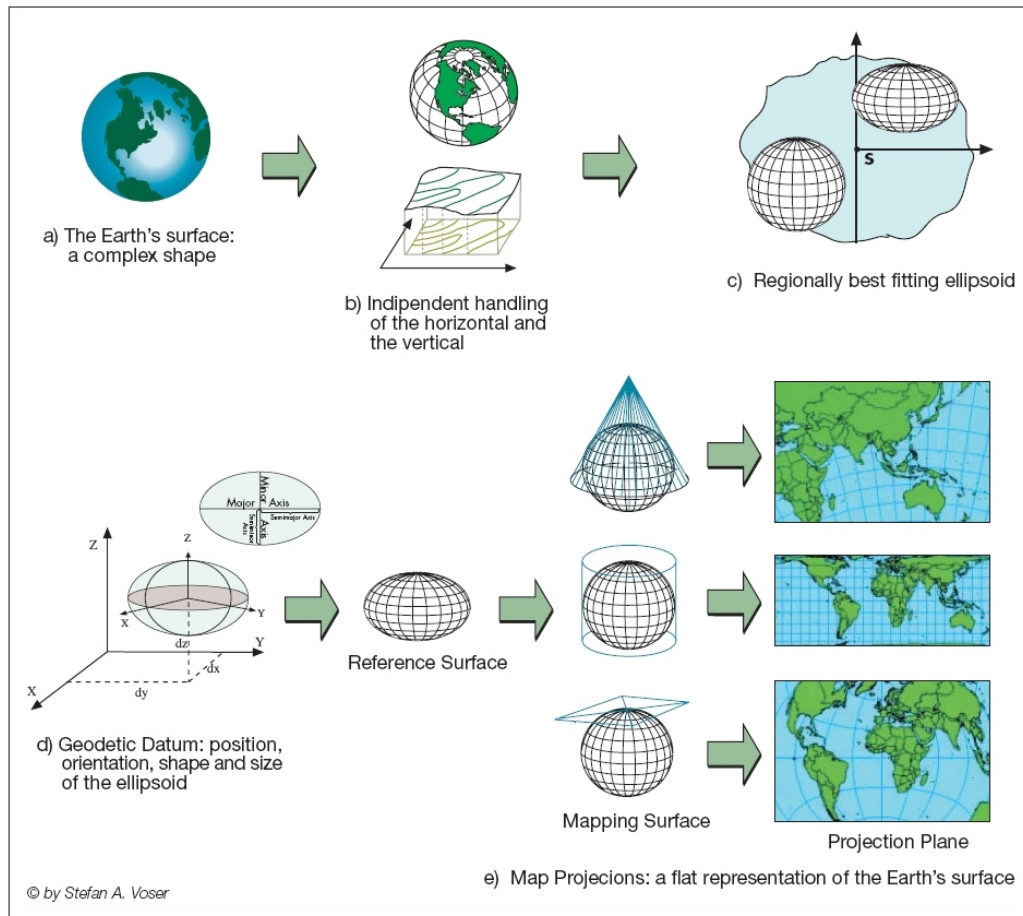


Abbildung 2.29: Datum und Kartenprojektion [Ann01]

Nachdem von der ICAO in Annex 11 [ICA98], Annex 14 [ICA99] und Annex 15 [ICA04] mit dem Referenzsystem WGS84 (World Geodetic Datum 84) ein für die Luftfahrt verbindliches globales geodätisches Bezugssystem festgelegt wurde, folgte die RTCA [RTC05a] diesen Anforderungen und legte für Geländedaten ebenfalls das Datum WGS84 als maßgebende horizontale Referenz fest.

2.4.2 Vertikale Bezugssysteme

Um die Höhenwerte eines Geländemodells korrekt einordnen zu können, bedarf es neben einem Verständnis der horizontalen Referenz einer besonderen Kenntnis der vertikalen Bezugssysteme. Wie auch bei den horizontalen Bezugssystemen, gibt es eine Vielzahl von Modellen, die die Form des Schwerfeldes bzw. deren mathematische Vereinfachung wiedergeben. Die reelle Form der Erde entspricht keinem idealen geometrischen Modell (z.B. Kugel), sondern ähnelt vielmehr einer „Kartoffel“. Da sich diese inhomogene Gestalt vom Schwerfeld ableitet, zieht man zur Modellierung der Erdoberfläche das Geoid heran (Abbildung 2.30).

In guter Annäherung wird das Geoid durch den mittleren Meeresspiegel der Weltmeere repräsentiert (MSL – Mean Sea Level). Das Potential der Erdschwere ist an jedem Ort der Geoidfläche gleich (Äquipotentialfläche). Die natürliche Lotrichtung und das Geoid stehen in

jedem Punkt senkrecht zueinander. Daher kann das Geoid durch Messen der Schwerkraft (Gravitation) bestimmt werden. Zwei beliebige Punkte auf dem Geoid haben das gleiche Schwerepotential und deshalb die gleiche Höhe und zwar „null“.

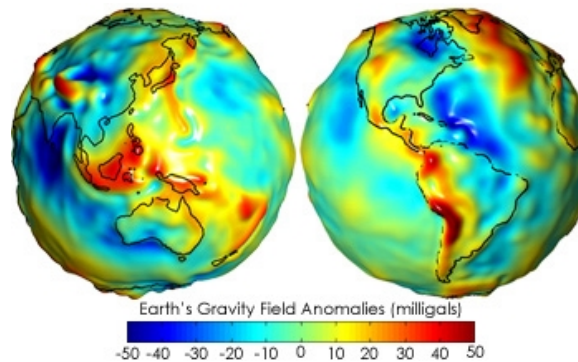


Abbildung 2.30: Schweremodell der Erde [Nas06]

Die Gestalt des Geoides leitet sich aus einer Vielzahl von Faktoren ab, die auf das Schwerefeld der Erde einwirken [GIS07]:

- die gravitative Anziehung der Erdmasse
- die aus der Erdrotation resultierende Fliehkraft (Zentrifugalkraft)
- Unregelmäßigkeiten im Aufbau der Erde
- kleinere Effekte wie die Gezeiten (Anziehung durch Mond und Sonne)

Da das Geoid keinen idealen geometrischen Körper darstellt, wird oftmals für die Beschreibung des Erdkörpers auch ein Rotationsellipsoid verwendet. Zwischen Ellipsoid und Geoid gibt es einen Höhenunterschied, der an jedem Punkt der Erde unterschiedlich ausfällt. Diese Differenz nennt man Undulation (N). Sie wird mit h als Ellipsoidhöhe und H als Geoidhöhe definiert als:

$$N = h - H \quad (2.16)$$

Die Höhendifferenz kann bis zu 100 m betragen. Der Winkel zwischen Ellipsoidnormalen (Ellipsoidisches Lot) und Geoidnormalen (Lotlinie) wird Lotabweichung genannt (Abbildung 2.31).

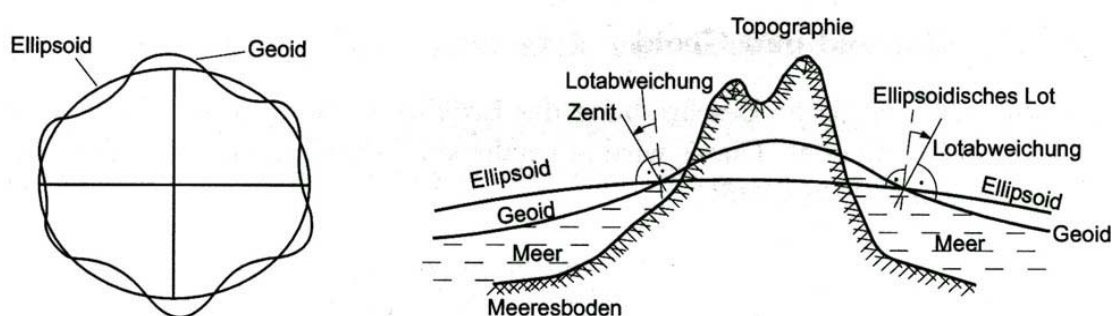


Abbildung 2.31: Beziehung zwischen Ellipsoid und Geoid [May01]

Für Geländemodelle oder Geländedaten im Allgemeinen, die in der Luftfahrt ihre Anwendung finden, ist als Standard das Geoid mit seiner mittleren Meereshöhe (MSL) festgelegt [RTC05a]. Dabei wird das Geoidmodell EGM-96 als weltweites Bezugssystem empfohlen [ICA04].

3 Anwendungsgebiete von Geländedaten in der Luftfahrt

Die Anwendungsgebiete von Geländedaten für Luftfahrtzwecke können prinzipiell in zwei Gruppen unterteilt werden. Hierbei wird zum einen zwischen den „Cockpit-based Applications“ und „Selected Ground-based (Ground-use) Applications“ unterschieden [RTC05a].

„Cockpit-based Applications“ beschreiben die Anwendungen, welche dem Piloten während des Fluges zur Verfügung stehen. Von besonderer Bedeutung sind nach [RTC05a] und [ICA04] folgende Applikationen:

- Geländewarnsysteme (TAWS – Terrain Awareness and Warning System)
- Notfallverfahrensplanung beim Free Flight
- Bestimmung von Notlandeplätzen
- Synthetische Flugführungsanzeigen (SVS – Synthetic Vision System)
- A-SMGCS – Advanced Surface Movement Guidance and Control System (Rollführung)

„Selected Ground-based Applications“ stellen bodenseitige Anwendungen dar und haben einen planerischen bzw. informativen Charakter. Nach [RTC05a] [ICA04] können hierbei folgende Anwendungsgebiete genannt werden:

- Planung minimaler Sicherheitshöhen (MSAW – Minimum Safe Altitude Warning)
- Planung von IFR-Verfahren (Instrumentenflug)
- Planung von Engine-Out Verfahren (Triebwerksausfall)
- Simulation und Pilotenausbildung
- Produktion von Flugkarten

Neben den hier beschriebenen Anwendungen gibt es eine Vielzahl weiterer Systeme, die auf digitale Höheninformationen zurückgreifen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Richtlinien, die sich mit digitalen Geländedaten in der Luftfahrt befassen vorgestellt und diskutiert. Anschließend wird eine Auswahl der oben genannten Anwendungen beschrieben und die Bedeutung von digitalen Höheninformationen für deren Nutzung aufgezeigt.

3.1 Internationale Standards

Da digitale Geländeinformationen in der Luftfahrt einen deutlichen Sicherheitsgewinn darstellen können, ist es notwendig, eine Qualität sicherzustellen, die den Anforderungen der Luftfahrt gerecht wird. Hierzu wurde durch die ICAO (International Civil Aviation Organization) sowie die RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) eine Reihe von Richtlinien verfaßt, die sich mit der Qualitätssicherung von Geländedaten befassen.

Die ICAO ist eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen, welche an den „Economic and Social Council (ECOSOC)“ gebunden ist. Sie wurde 1944 durch das Übereinkommen über die internationale Zivilluftfahrt (Chicagoer Abkommen) gegründet und hat ihren Sitz in Montreal (Kanada). Ihr gehören 190 Vertragsstaaten an. Deutschland wird durch eine ständige Delegation des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) vertreten. Zu ihren primären Aufgaben gehört die Standardisierung und Sicherung des zivilen

Luftverkehrs. Im Rahmen dieser Tätigkeiten wurden durch die ICAO die “International Standards and Recommended Practices“ (SARP) herausgegeben, die als Gesetzesgrundlage für alle der ICAO angebotenen Staaten Gültigkeit haben. Die Anforderungen an elektronische Geländedaten sind im Annex 15 Amendment 33 [ICA04] dieser Richtlinien definiert und wurden im Jahr 2004 veröffentlicht.

Die RTCA ist eine gemeinnützige Gesellschaft mit Sitz in Washington (D.C.), die sich zur Aufgabe gemacht hat, die Entwicklung der Luftfahrt zu fördern. Sie steht dabei staatlichen Behörden mit auf Konsens basierenden Empfehlungen in aktuellen Fragen beratend zur Seite [RTC02]. Eine Betrachtung und Spezifizierung von elektronischen Geländedaten erfolgte durch die RTCA mit dem *Spezial Committee 193*, die im März 2002 die „User Requirements for Terrain and Obstacle Data“ (RTCA DO-276) veröffentlichten, welche die Mindestanforderungen an Gelände- und Hindernisdaten beinhalten [RTCA02]. Dieses Dokument liegt seit August 2005 als erweiterte Ausgabe (RTCA Do-276A) vor [RTC05a]. Die hier genannten Dokumente wurden in Zusammenarbeit mit der EUROCAE *Working Group 44* auf den Weg gebracht.

Während sich die oben aufgeführten Standards primär mit der Qualitätssicherung beim Erfassen und Bereitstellen von Geodaten beschäftigen, befaßt sich das Dokument Do-291 (Interchange Standards for Terrain, Obstacle and Aerodrome Mapping Data) mit der Definition eines Datenmodells für den Austausch von Geodaten [RTC04].

Um eine Qualitätssicherung bei der Prozessierung und Verteilung von aeronautischen Daten sicherzustellen, wurde von der RTCA bereits 1998 der Standard „Standards for Processing Aeronautical Data“ (Do-200A) verabschiedet, der die Mindestanforderungen für alle Phasen der Prozessierung von Aeronautischen Daten hinsichtlich Qualitätssicherung und Qualitätsmanagement definiert [RTC98].

Im Folgenden werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit maßgeblichen Dokumente RTCA Do-276A, ICAO Annex 15 und RTCA Do-200A genauer beschrieben und diskutiert. Das Dokument Do-291 sei an dieser Stelle lediglich erwähnt.

3.1.1 User Requirements for Terrain and Obstacle Data (RTCA/DO-276A)

Das Dokument RTCA/DO-276A stellt einen Leitfaden für die Erfassung von Gelände- und Hindernisdaten dar. Daneben bildet es eine Orientierungshilfe für die Prozessierung, Systemimplementierung und die Endnutzung für entsprechende Geodaten in der Luftfahrt. Bezüglich der Handhabung von aeronautischen Daten ist dieser Standard eine Erweiterung zum RTCA/DO-200A.

Innerhalb dieses Standards werden die Minimalanforderungen des Nutzers hinsichtlich Gelände- und Hindernisdaten von der Generierung bis hin zum ganzen Lebenszyklus definiert. Daneben werden die numerischen Anforderungen an die Datenbasis für verschiedene Luftfahrtanwendungen genauer beschrieben. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, daß die Anforderungen auf der Grundlage von Nutzeranforderungen und nicht unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten formuliert wurden.

Die spezifizierten Forderungen hinsichtlich Integrität, Genauigkeit und Auflösung sowie Vollständigkeit der letztendlich entstandenen Datenbank sind damit nicht zwingend für die „primäre Navigation“ eines Flugzeuges geeignet [RTC05a].

Die Anwendbarkeit der Spezifikation bezieht sich auf die vier wesentlichen Abdeckungsbereiche der zivilen Luftfahrt.

3.1.1.1 Abdeckungsbereiche

Um den Bedürfnissen der verschiedenen Flugphasen eines zivilen Luftfahrzeuges gerecht zu werden, werden die Anforderungen an Genauigkeit, Integrität und Auflösung für insgesamt vier verschiedene Bereiche definiert (Abbildung 3.1).

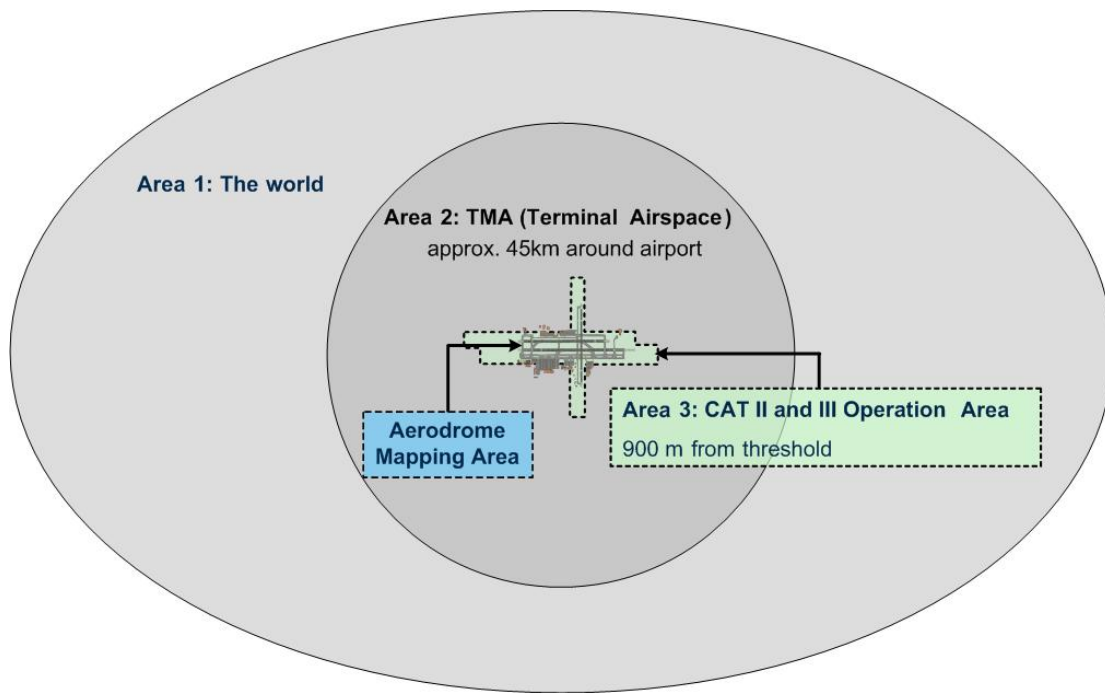


Abbildung 3.1: Abdeckungsbereiche der RTCA/DO-276A [nach RTC05a]

Area 1: The world

Area 1 bildet die gesamte Welt ab. Die numerischen Anforderungen für dieses Gebiet sind aus den existierenden SARPs (Standards and Recommended Practices) für *En-Route* Hindernisinformationen der ICAO abgeleitet. Die Anforderungen wurden so angepaßt, daß sie sowohl digitalen Bedürfnissen genügen als auch von heutigen und zukünftigen Vermessungstechniken erfüllt werden können [RTC05a]. Area 1 bildet somit die Reiseflugphase eines zivilen Flugzeuges ab.

Area 2: The Terminal Airspace

Area 2 stellt den *Terminal Airspace* dar, wie er in der AIP (Aerodrome Information Publication) definiert ist. Für Flughäfen, die keine offizielle TMA (*Terminal Maneuvering Area*) besitzen, wird Area 2 durch eine Fläche beschrieben, die einen Radius von 45 km um den *Aerodrome Reference Point* (ARP) aufweist. Ausgenommen sind dabei Gebiete der Area 2, die aufgrund von „*High Terrain*“ oder „*NoFly*“-Bedingungen ausgenommen sind [RTC05a]. Der TMA kann vereinfacht als der kontrollierte Luftraum des An- und Abflugbereiches um einen Flughafen herum beschrieben werden.

Area 3: CAT II / III Operation Area

Area 3 beschreibt die *Radar Altimeter Area* für CAT II/III instrumentengestützte Präzisionsanflüge. Dieses Gebiet dehnt sich 900 m um die *Thresholds* der Start- und Landebahnen aus. Entlang der Mittellinie der Start- und Landebahnen beträgt die Ausdehnung 120 m [RTC05a]. Cat II Präzisionsanflüge weisen eine Entscheidungshöhe (Decision Height – DH) von 30 - 60 m und eine Pistensichtweite (Runway Visibility Range - RVR) von ≥ 300 m auf. Die Sichtbedingungen für CAT III Anflüge werden in drei verschiedene Unterstufen unterteilt und weisen erheblich schlechtere Sichtbedingungen auf, die bis zu einer DH und RVR von 0 m heruntergehen. Die Entscheidungshöhe ist jener Moment, bis zu dem die Cockpitbesatzung des anfliegenden Luftfahrzeugs über die endgültige Durchführung der Landung entschieden haben muß [Wip05].

Aerodrome Mapping Area

Flughafendatenbanken (Aerodrome Mapping Databases - AMDBs) bilden eine Auswahl von Flughafenelementen und –informationen ab, welche zur Navigation von Flugzeugen auf dem

Flugplatz benötigt werden. Ebenfalls werden solche Datenbanken für das Pilotentraining, die Kartenherstellung und die Rollwegplanung verwendet. Da insbesondere für die Rollführung Informationen über Hindernisse auf dem Flugplatz unabdingbar sind, werden auch Angaben über Gefährdungen benötigt, die durch Geländeinformationen hervorgerufen werden. Hierzu definiert die RTCA/DO 276A die Anforderungen an digitale Geländeinformationen, um alle notwendigen Angaben bereitzustellen, die in dem RTCA/DO 272A Dokument für den unmittelbaren Rollbereich der Flugzeuge gefordert werden [RTC05a].

3.1.1.2 Attribute von Geländedaten

Eine Geländedatenbank kann als die digitale Abbildung der vertikalen Ausdehnung eines Geländeabschnittes durch die Darstellung von diskreten Punkten bezeichnet werden. Neben der Beschreibung der Organisationsform und den Informationen über die geographischen Bezugssysteme werden in der RTCA/DO 276A weitere Angaben zu einem jeden Datensatz gefordert, um die Genauigkeit wie auch die Integrität der Daten sicher zu stellen. Zur Beschreibung des Höhendatensatzes wurden insgesamt 22 Attribute definiert, von denen 19 zwingend (*required*) und 3 wenn möglich (*optional*) bereitgestellt werden sollen. Eine Auflistung der Attribute sowie die Auszeichnung, ob die Werte unbedingt oder optional einem Geländedatensatz zugeordnet werden müssen, kann Tabelle 3.1 entnommen werden.

Tabelle 3.1: Geländedaten Attribute [RTC05a]

| Attribute | Required/Optional |
|-----------------------------|--------------------------|
| Area of Coverage | Required |
| Data Source Identifier | Required |
| Acquisition Method | Required |
| Post Spacing | Required |
| Horizontal Reference System | Required |
| Horizontal Resolution | Required |
| Horizontal Accuracy | Required |
| Horizontal Confidence Level | Required |
| Horizontal Position Data | Required |
| Elevation | Required |
| Database Units | Required |
| Elevation Reference | Required |
| Vertical Reference System | Required |
| Vertical Resolution | Required |
| Vertical Accuracy | Required |
| Vertical Confidence Level | Required |
| Surface Type | Optional |
| Recorded Surface | Required |
| Penetration Level | Optional |
| Known Variations | Optional |
| Integrity | Required |
| Date and Time Stamp | Required |

Im Folgenden werden die Attribute nach [RTC05a] kurz beschrieben:

Area of Coverage: Attribut, welches die Grenzen (Abdeckung) des abgebildeten Geländeabschnittes beschreibt.

Data Source Identifier: Information, die dazu dient, den Datenerzeuger eindeutig und dauerhaft zu identifizieren.

Acquisition Method: Beschreibt die Generierungsmethode, mit welcher der Datensatz erzeugt wurde. Das Attribut soll in Verbindung mit anderen Attributen (z.B. Surface Type) eine weitergehende Bewertung des Datensatzes zulassen.

Post Spacing: Der Stützstellenabstand gibt den Abstand (im Winkel- oder Längenmaß) zweier benachbarter Höhenpunkte wieder, wobei dieser in Länge und Breite differieren kann.

Horizontal Reference System: Das horizontale Bezugssystem beschreibt das Datum, welchem die Höhenwerte zugeordnet sind. Üblicherweise ist dies das durch die ICAO geforderte Koordinatensystem WGS84. Soll ein anderes Datum Anwendung finden, müssen sowohl das Koordinatensystem als auch die Transformationsparameter genau spezifiziert werden.

Horizontal Resolution: Die Genauigkeit der horizontalen Auflösung kann durch zwei Komponenten beeinflusst werden. Zum einen durch den bei der Vermessung verwendeten Maßstab der Einheiten, zum anderen durch die Anzahl der Dezimalstellen, mit denen die Höheninformationen gespeichert werden.

Horizontal Accuracy: Die horizontale Genauigkeit gibt den Grad der Übereinstimmung zwischen einem gemessenen und einem realen Positionswert an. Für gemessene Punkte wird die Genauigkeit üblicherweise mit einem Konfidenzintervall (*Level of Confidence*) angegeben, in dem sich der Lagefehler bewegt. Die horizontale Genauigkeit muß in denselben Einheiten abgebildet werden wie der Höhenwert.

Horizontal Confidence Level: Das horizontale Konfidenzintervall gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Fehler in festgelegten Grenzen auftritt. Das Konfidenzintervall wird üblicherweise in Prozent angegeben.

Horizontal Position Data: Die horizontalen Lageinformationen werden durch die geographische Länge und Breite beschrieben. Die geographische Breite beschreibt die Nord-Süd Komponente einer Koordinate, während die Länge den Ost-West Anteil beinhaltet. Die Koordinaten werden im Gradmaß angegeben. Sollte der Geländedatensatz in einem projizierten Koordinatensystem vorliegen, muß der Projektionstyp in einem entsprechenden Attribut abgelegt werden.

Elevation: Die Erhebung bzw. Höhenangabe ist der vertikale Abstand eines Punktes auf oder fixiert zur Erdoberfläche bzw. zu einem Bezugssystem (siehe auch 2.4.2). Die Höhenangabe muß als absolute Distanz erfolgen, die konsistent zu den Angaben der Genauigkeit und Auflösung ist.

Database Units: Sofern gefordert, müssen für jedes Attribut die verwendeten Einheiten angegeben werden. Außerdem müssen die Einheiten innerhalb der Datenbank konsistent sein.

Elevation Reference: Die Referenzierung eines Höhenpunktes von Geländedaten gibt den Bezug und die Darstellung eines einzelnen Wertes in der Gesamtheit eines Datensatzes wieder (siehe auch 2.3).

Vertical Reference System: Dieses Attribut beschreibt das vertikale Bezugssystem der Höhenwerte. Es wird gefordert, daß sich die Höheninformationen in der Luftfahrt auf den „Mean Sea Level (MSL)“ als vertikales Datum beziehen. Als Bezugsgeoid findet das EGM-96 Gravitationsmodell Verwendung [ICA04].

Sollte ein anderes Bezugssystem angewendet werden, muß eine genaue Beschreibung des Datums sowie die Transformationsparameter bereitgestellt werden.

Vertical Resolution: Wie auch bei der horizontalen Auflösung wird die Genauigkeit der vertikalen Auflösung durch zwei Komponenten beeinflusst. Zum einen ist das der bei der Vermessung verwendete Maßstab der Einheiten zum anderen die Anzahl der Dezimalstellen, mit denen die Höheninformationen gespeichert werden.

Vertical Accuracy: Analog zur horizontalen Genauigkeit gibt die vertikale Genauigkeit den Grad der Übereinstimmung zwischen einem gemessenen und einem realen Positionswert an. Für gemessene Punkte wird die Genauigkeit üblicherweise mit einem Konfidenzintervall (*Level of Confidence*) angegeben, in dem sich der Lagefehler bewegt. Die vertikale Genauigkeit muß in denselben Einheiten abgebildet werden wie die Höhenangabe.

Vertical Confidence Level: Die Eigenschaften des vertikalen Konfidenzintervalls sind identisch mit denen des horizontalen.

Surface Type: Attribut, welches die Oberflächenart des abgebildeten Geländeabschnittes (z.B. Wald, Wasser, Grasland etc.) beschreibt.

Recorded Surface: Attribut, welches die Klassifikation der aufgenommenen Oberfläche beschreibt. Durch die Verwendung verschiedener Technologien können Geländemodelle unter anderem als *DGM*, *DOM* und *DOM als die erste Reflektion* unterschieden werden (vgl. auch Abschnitt 2.1).

Penetration Level: Attribut, welches die Information bereit hält, wie weit ein verwendeter Sensor in die Oberfläche des aufgezeichneten Gebietes eindringt (Differenz zwischen einem DOM und dem DOM als erste Reflektion). Abhängig von der Oberflächenstruktur ist es allerdings größtenteils unmöglich, hierüber eine verlässliche Aussage zu machen. Dieses Attribut ist für eine Geländedatenbank nicht verpflichtend und kann - wenn möglich - optional angefügt werden.

Known Variations: Attribut, welches Informationen über vorhersehbare Änderungen der Höhendaten bereitstellt. Solche Änderungen können durch saisonale Gegebenheiten (bspw. Schneefall) hervorgerufen werden. Auch diese Information muß nicht zwingend bereitgestellt werden.

Integrity: Die Integrität eines Datensatzes beschreibt den Grad der Sicherheit, mit dem die enthaltenen Informationen seit ihrer Generierung bzw. Veröffentlichung weder verloren gehen noch geändert werden. Die Integrität eines Datensatzes muß so abgebildet werden, daß die Wahrscheinlichkeit einer versehentlichen Änderung eines Datenelementes seit der Erstellung sichtbar wird. Weiterhin kann die Integrität von Geländedaten in „*Routine*“ und „*Essential*“ unterschieden werden. Während die Spezifizierung „*Routine*“ lediglich eine übliche und erwünschte Datenintegrität beschreibt, fordert das Attribut „*Essential*“ zwingend den geforderten Wert.

Date and Time Stamps: Attribut, das den Zeitpunkt der Erstellung bzw. Modifikation eines Datensatzes kennzeichnet.

3.1.1.3 Numerische Anforderungen

Im Folgenden werden die Qualitätsanforderungen an digitale Geländedaten definiert, so daß sie den hohen Anforderungen verschiedener Luftfahrtanwendungen gerecht werden. Einige der heutigen Applikationen begnügen sich durchaus mit geringeren Qualitätsstandards, andere hingegen könnten mit einer besseren Datengrundlage weitergehende Funktionalität anbieten. Daneben ist es möglich, daß die definierten Anforderungen die Bedürfnisse künftiger Applikationen nicht mehr hinreichend erfüllen [RTC05a].

Die Anforderungen, die hinsichtlich Integrität, Genauigkeit, Vollständigkeit und Auflösung in dem Dokument RTCA/DO-276A angegeben werden, haben nicht zwingend das Potential, um für die primäre Navigation eines Flugzeuges eingesetzt werden zu können. Die spezifizierten Qualitätsparameter sind nicht für eine bestimmte Applikation oder ein bestimmtes Systemlevel kennzeichnend. Vielmehr gilt es, die Parameter aus dem einen gesamten sicherheitskritischen System abzuleiten, von dem die Datenbank nur einen einzelnen Teil darstellt [RTC05a].

Im Folgenden werden die numerischen Anforderungen an digitale Geländedaten für alle in 3.1.1.1 beschriebenen Bereiche aufgeführt und anschließend diskutiert.

Area 1: The World

Tabelle 3.2 zeigt die Anforderungen, die im RTCA/DO-276A definiert sind, damit sie den Anforderungen eines zivilen Luftfahrzeuges während des Reisefluges genügen.

Tabelle 3.2: Anforderungen an digitale Geländedaten: Area 1 [RTC05a]

| Area / Attribute | Area 1 – Continuous (The World) |
|-------------------------|--|
| Horizontal Accuracy | 50.0 m |
| Data Integrity Routine | Routine (10^{-3}) |
| Vertical Accuracy | 30.0 m |
| Vertical Resolution | 1.0 m |
| Confidence Level | 90% |
| Post Spacing | 3 arc seconds (~ 100 m) |

Vergleicht man die hier aufgeführten Werte mit den Anforderungen an die Genauigkeit des DTED Level 1 (vgl. Tabelle 2.3 und Tabelle 2.4), sind die angestrebten Werte der Lagegenauigkeit identisch. Daraus läßt sich ableiten, daß bei der Erstellung des RTCA/DO-276A das Datenformat DTED Level 1 als geeignet für das Operieren eines Flugzeuges im Reiseflug bewertet wurde.

Bei kritischer Betrachtung von geforderter Lagegenauigkeit und verlangtem Stützstellenabstand des Höhendatensatzes wird allerdings deutlich, daß die mit einem Stützstellenabstand von ca. 100 m angestrebte vertikale Genauigkeit von 30 m nicht immer korrekt dargestellt werden kann. Diese Tatsache steht in einem direkten Zusammenhang mit der Rauigkeit des Geländes. Treten in einem abgebildeten Geländeabschnitt starke Steigungsschwankungen auf, kann durchaus innerhalb eines diskreten abgebildeten Höhenwertes eine größere Abweichung gegenüber den tatsächlichen kontinuierlichen Werten des reellen Geländes auftreten als es die Spezifikation erlaubt. Um dieser Tatsache entgegenzuwirken, ist es notwendig, neben den Genauigkeitsangaben auch die Randbedingungen zu benennen, unter denen der dargestellte Wert Gültigkeit hat.

An einem Beispiel soll schließlich in 3.1.4 gezeigt werden, inwieweit der Stützstellenabstand einen direkten Einfluß auf die Darstellbarkeit der Genauigkeit hat.

Area 2: The Terminal Airspace (TMA)

Für den Bereich des An- bzw. Abfluges eines Flugzeuges um einen Flughafen herum, werden aufgrund der bodennahen Operation des Luftfahrzeuges wesentlich höhere Anforderungen an Genauigkeit und Integrität der aeronautischen Datenbanken gestellt. Diese spiegeln sich in den Bedürfnissen des Datenmaterials wieder, die in [RTC05a] für den *Terminal Airspace* definiert werden (vgl. Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: Anforderungen an digitale Geländedaten: Area 2 [RTC05a]

| Area / Attribute | Area 2 – Terminal Airspace |
|-------------------------|-----------------------------------|
| Horizontal Accuracy | 5.0 m |
| Data Integrity Routine | Essential (10^{-5}) |
| Vertical Accuracy | 3.0 m |
| Vertical Resolution | 0.1 m |
| Confidence Level | 90% |
| Post Spacing | 1 arc seconds (~ 30 m) |

Stellt man die für die TMA verlangten Parameter mit denen für DTED Level 2 in Tabelle 2.3 und Tabelle 2.4 gegenüber, zeigt sich, daß die Forderungen hinsichtlich des Stützstellenabstandes identisch sind. Die Anforderungen an die Lagegenauigkeit sind in [RTC05a] allerdings wesentlich höher, als in der DTED Spezifikation gefordert.

Area 3: CAT II / III Operation Area

Der Bereich, der Gültigkeit für CAT II/III instrumentengestützte Präzisionsanflüge besitzt, weist nach [RTC05a] die höchsten Anforderungen an digitale Geländedaten auf, die während des Flugbetriebs Verwendung finden. Die Cockpitbesatzung kann aufgrund der geringen Sichtminima erst zu einem sehr späten Zeitpunkt des Anfluges entscheiden, ob der Landevorgang zu Ende geführt wird oder ob ein Abbruch erfolgt. Aus diesem Grund muß sich die Besatzung sehr lange auf die Bordsysteme und die dazugehörigen Datenbanken verlassen, was sich in den in Tabelle 3.4 aufgelisteten Anforderungen widerspiegelt.

Tabelle 3.4: Anforderungen an digitale Geländedaten: Area 3 [RTC05a]

| Area / Attribute | Area 3 – CAT II / III Operation Area |
|------------------------|--------------------------------------|
| Horizontal Accuracy | 2.5 m |
| Data Integrity Routine | Essential (10^{-5}) |
| Vertical Accuracy | 1.0 m |
| Vertical Resolution | 0.1 m |
| Confidence Level | 90% |
| Post Spacing | 0.3 arc seconds (~ 10 m) |

Der vorgegebene Stützstellenabstand entspricht etwa dem eines DTED Level 3 Datensatzes. Da in der offiziellen DTED Spezifikation [NGA00] das DTED Level 3 Format noch nicht spezifiziert ist, läßt sich diesbezüglich kein Vergleich hinsichtlich der Genauigkeiten durchführen.

Aerodrome Mapping Area

AMDBs müssen Informationen über Hindernisse auf dem Flugplatz abbilden, die eine Gefährdung des Rollvorgangs darstellen können. Nach RTCA/DO-272A sind dies Hindernisse, die auf den Rollwegen sowie in einem Umkreis von 50 m um diese herum, eine Höhe von 50 cm und mehr aufweisen. Um aus einer Geländedatenbank natürliche Hindernisse ableiten zu können, die diesen Anforderungen genügen, muß diese sehr hohen Genauigkeitsanforderungen genügen, die sich nach [RTC05a] wie folgt definieren:

Tabelle 3.5: Anforderungen an digitale Geländedaten: AMDB Area [RTC05a]

| Area / Attribute | Aerodrome Mapping |
|------------------------|-------------------------|
| Horizontal Accuracy | 0.5 m |
| Data Integrity Routine | Essential (10^{-5}) |
| Vertical Accuracy | 0.5 m |
| Vertical Resolution | 0.01 m |
| Confidence Level | 95% |
| Post Spacing | 20 m |

Auffällig bei diesen Genauigkeitsangaben ist, daß im Vergleich zu dem CAT II/III Operationsgebiet die Anforderungen an die Lagegenauigkeit steigen, während die Forderungen an den Stützstellenabstand abnehmen.

3.1.2 ICAO Annex 15 - Aeronautical Information Services

Zielsetzung des Annex 15 zu den von der ICAO herausgegebenen International Standards and Recommended Practices ist es, den Fluß von Informationen und Daten sicherzustellen, die für die Sicherheit, die Ordnungsmäßigkeit wie auch die Effizienz der internationalen Luftfahrt benötigt werden. Mit Einführung der Flächennavigation (Area Navigation - RNAV), der computergestützten Navigationssysteme wie auch der Required Navigation Performance (RNP) hat sich die Bedeutung von aeronautischen Daten und Informationen signifikant geändert, da durch eine korrupte oder fehlerhafte Information die Sicherheit des Fluges beeinflusst wird. Um die Einheitlichkeit und die Konsistenz bei der Bereitstellung von aeronautischen Daten sicherzustellen, ist es notwendig, daß jeder Staat nur die Standards und Verfahren anwendet, die internationale Gültigkeit besitzen. Neben einer Vielzahl von international verbindlichen Richtlinien wird unter anderem auch die Handhabung von elektronischen Gelände- und Hindernisdaten geregelt, die durch das Amendment 33 dem seit 1953 existierenden Standard hinzugefügt wurden [ICA04].

3.1.2.1 Abdeckungsbereiche

Wie auch bei den User Requirements for Terrain and Obstacle Data (RTCA/DO-276A) wird in [ICA04] das Erfassungsgebiet in 4 unterschiedliche Bereiche unterteilt.

In [ICA04] beschreibt „Area 1“ das gesamte Gebiet eines Staates. Obwohl in [RTC05a] „Area 1“ die gesamte Welt abbildet, sind im Grunde die abzubildenden Bereiche identisch, da die ICAO eine verbindliche Regelung für Staaten und deren Regierungen beinhaltet und im Gegensatz zur RTCA keinen industriellen Standard darstellt.

Analog zu [RTC05a] beschreibt „Area 2“ die TMA wie sie in den staatlichen AIPs veröffentlicht werden. Sollte die TMA kleiner ausfallen als ein 45 km Radius um den ARP herum, so stellt dieser die gültige Begrenzung dar. Sollte keine TMA definiert sein, besitzt auf jeden Fall der 45 km Radius Gültigkeit.

Im Gegensatz zu [RTC05a] definiert die ICAO „Area 3“ als den Bereich, der ein Gebiet von 90 m um die Mittellinie der Startbahn aufspannt. Für andere Bereiche, auf denen Rollbewegung stattfindet, erstreckt sich dieses Gebiet bis zu 50 m über die Ränder der entsprechenden Elemente hinaus. In [RTC05a] wird dieser Sektor als „Area 4“ beschrieben.

„Area 4“ wird nach der ICAO als der Bereich beschrieben, der Landebahnen mit CAT II/III Präzisionsanflügen abbildet. Die Breite der abgebildeten Fläche beträgt 60 m auf jeder Seite der Mittellinie der Startbahn während die Länge sich bis auf 900 m jenseits des Thresholds ausdehnt. In [RTC05a] wird dieser Sektor als „Area 3“ beschrieben.

3.1.2.2 Geländedaten Attribute

Die in [ICA04] definierten Attribute, die einen Geländedatensatz beschreiben sollen, entsprechen denen der „User Requirements for Terrain and Obstacle Data (RTCA/DO-276A)“ und können Tabelle 3.1 entnommen werden. Einziger Unterschied zwischen den beiden Anforderungsdokumenten ist, daß das Attribut „Surface Type“ nicht nur optional ist, sondern von der ICAO als verbindlich vorgeschrieben wird.

3.1.2.3 Numerische Anforderungen

Wie auch bei der RTCA werden durch die ICAO verbindliche Zahlenwerte für die Anforderungen an digitale Geländedaten vorgegeben. Vergleicht man die Werte, die durch die ICAO gefordert werden (Tabelle 3.6) mit denen der RTCA (Tabelle 3.2 bis Tabelle 3.5), sieht man, daß die Anforderungen identisch sind. Allerdings gilt es auch hier zu berücksichtigen, daß bei RTCA und ICAO Area 3 und Area 4 vertauscht sind.

Die der ICAO angehörigen Staaten sind verpflichtet, zukünftig für die vier beschriebenen Gebiete Höheninformationen bereitzustellen. Nach [ICA04] müssen für Area 1 und Area 4 die Höheninformationen bis zum 20. November 2008 vorliegen. Die Verfügbarkeit der

Höhendaten für Area 2 und Area 3 muß bis zum 18. November 2010 durch die Mitgliedsstaaten sichergestellt werden.

Tabelle 3.6: Anforderungen an digitale Geländedaten, ICAO Area 1-4 [ICA04]

| Areas / Attribute | Area 1 | Area 2 | Area 3 | Area 4 |
|--------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| Post Spacing | 3 arc sec. (~ 100m) | 1 arc sec. (~ 30m) | 0,6 arc sec. (~ 20m) | 0,3 arc sec. (~ 9m) |
| Vertical Accuracy | 30 m | 3 m | 0,5 m | 1 m |
| Vertical Resolution | 1 m | 0,1 m | 0,01 m | 0,1 m |
| Horizontal accuracy | 50 m | 5 | 0,5 | 2,5 |
| Confidence Level (1 σ) | 90% | 90% | 90% | 90% |
| Data Classification | routine | essential | essential | essential |
| Integrity Level | 1 X 10 ⁻³ | 1 X 10 ⁻⁵ | 1 X 10 ⁻⁵ | 1 X 10 ⁻⁵ |
| Maintanance Period | as required | as required | as required | as required |

3.1.3 Standards for Processing Aeronatical Data (RTCA/DO-200A)

Das durch die RTCA verfaßte Dokument „*Standards for Processing Aeronatical Data*“ (DO-200A) beschreibt die Mindestrichtwerte sowie die Anleitung zur Prozessierung aeronautischer Daten, die für die Navigation, Flugplanung, Vermeidung von Geländekonflikten, Flugsimulation sowie anderen Applikationen benötigt werden. All diese Daten werden schließlich vom Erzeuger an den Nutzer der Datenbanken weitergegeben. Ziel dieser Spezifikation ist es, ein Qualitätsmanagement sicherzustellen, welches ein Verfälschen bzw. Verlorengehen von Informationen während der Weitergabe und Prozessierung der Daten verhindert [RTC98].

Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Datengewinnung bzw. -erhebung im Vordergrund steht, sei an dieser Stelle zwar der gültige Standard zur Prozessierung und Weitergabe von aeronautischen Daten erwähnt, jedoch nicht im einzelnen betrachtet.

3.1.4 Diskussion

Wie in den Qualitätsanforderungen RTCA/DO-276A und ICAO Annex 15 deutlich wird, nehmen die Anforderungen an Lagegenauigkeit wie auch Integrität mit zunehmender Annäherung des Flugzeuges an den Boden zu. Um die angestrebten Qualitätsmerkmale zu erreichen, nimmt die Größe des Stützstellenabstandes - bis auf den Aerodrome Mapping Bereich – analog zu den DTED Levels ab, während Auflösung, Genauigkeit und Integrität der Daten zunehmen. Dieses Vorgehen ist geeignet, den Anforderungen jeder Flugphase gerecht zu werden.

Bei kritischer Betrachtung von geforderter Lagegenauigkeit und verlangtem Stützstellenabstand des Höhendatensatzes wird allerdings deutlich, daß die mit dem spezifizierten Stützstellenabstand angestrebte vertikale Genauigkeit nicht ohne weiteres korrekt dargestellt werden kann. Diese Tatsache steht in einem direkten Zusammenhang mit der Rauigkeit des Geländes. Treten in einem abgebildeten Geländeabschnitt starke Steigungsschwankungen auf, kann es innerhalb eines diskret abgebildeten Höhenwertes zu einer großen Abweichung gegenüber den tatsächlichen kontinuierlichen Werten des reellen Geländes kommen. Um dieser Tatsache entgegenzuwirken ist es notwendig, neben den Genauigkeitsangaben auch anzugeben, unter welchen Randbedingungen der dargestellte Wert Gültigkeit hat. Dies wird durch das Attribut „Elevation Reference“ genau definiert. Abbildung 3.2 verdeutlicht, daß es einen wesentlichen Unterschied macht, ob eine Höheinformation durch den Mittel- oder Maximalwert des darunterliegenden Geländes dargestellt wird.

Um diese Problematik zu verdeutlichen, soll an einem Beispiel gezeigt werden, inwieweit der Stützstellenabstand einen direkten Einfluß auf die Darstellbarkeit der Genauigkeit hat. Hierzu

wird exemplarisch ein potentieller Datensatz für Area 1 untersucht. Steigt etwa das reale Gelände innerhalb eines abgebildeten Stützstellenabstandes von 100 m kontinuierlich um 100 m an (entspricht einer Steigung von 45 Grad bzw. 100 %), können die in Tabelle 3.2 geforderten Genauigkeiten nicht mehr ohne weiteres abgebildet werden, sofern man die Werte in direkten Bezug zu den reellen kontinuierlichen Werten setzt. Wird der abgespeicherte Höhenwert aus dem Mittelwert des unter ihm liegenden Geländeabschnitts abgeleitet, beträgt der maximale Fehler innerhalb der aufgezeichneten Zelle +/- 50 m. Da in einem alpinen Gebiet solche und sogar größere Steigungen ohne weiteres mit einer großen Häufigkeit auftreten können, ist damit zu rechnen, daß die unerlaubten Abweichungen das Konfidenzintervall von 90% unterschreiten und somit die Spezifikation nicht erfüllt werden kann. Als Konsequenz kann ein solcher Datensatz selbst für den Reiseflug eines Flugzeuges nicht ohne weiteres verwendet werden.

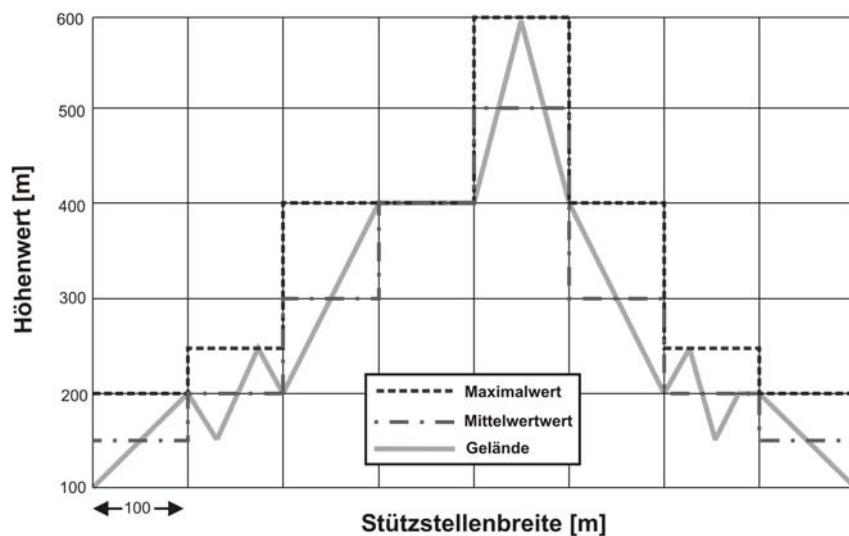


Abbildung 3.2: Abhängigkeit von Genauigkeit und Stützstellenabstand

Analysiert man im selben Zusammenhang die numerischen Anforderungen, die für Area 2 und 3 aufgestellt wurden, läßt sich erkennen, daß die Diskrepanz zwischen Stützstellenabstand und Lagegenauigkeit sogar noch zunimmt und somit eine Darstellbarkeit bzw. Einhaltung der geforderten Genauigkeiten in rauen Geländeabschnitten immer schwieriger wird.

Um diesem Problem zu begegnen, könnte der aufgezeichnete Geländeabschnitt statt über den Mittelwert über den Maximalwert abgebildet werden (vgl. Abbildung 3.2). Hiermit kann nun weitgehend sichergestellt werden, daß kein natürliches Hindernis in den Luftraum des Flugzeuges ragen wird. Da auf diesem Wege zu niedrig abgebildete Geländeabschnitte, die ohnehin unkritisch sind, nicht mehr in Betracht gezogen werden, werden allerdings, streng gesehen, die geforderten Genauigkeiten noch weniger eingehalten, obwohl diese Art der Geländedarstellung für normale Flugoperationen vorteilhaft ist.

Anhand dieses Beispiels läßt sich zeigen, daß bei einer Auslegung der Qualitätsparameter kritisch geprüft werden muß, ob die numerischen Anforderungen in einem sinnvollen Zusammenhang stehen oder ob man Randbedingungen benennen muß, damit die Anforderungen ihre Gültigkeit behalten. Ein konsequenter Ansatz wäre die Abbildung der Höheninformationen über den Maximalwert. Daneben sollten die Anforderungen so definiert werden, daß das Gelände für den Streckenflug (Steigflug, Reiseflug, Abstieg und Warteflug) unkritisch ist, welches in der Realität niedriger ist als in der Datenbank abgebildet. Kommt es jedoch zu einer gewollten Annäherung an den Boden (z.B. Abfangmanöver), ist eine korrekte Abbildung der Geländeinformationen sowohl in positiver als auch in negativer Richtung

zwingend notwendig, damit es zu keiner „virtuellen Durchdringung“ des Geländes kommt bzw. das Abfangmanöver zu früh eingeleitet wird.

Zu ähnlichen Problematiken kommt es auch bei Flugoperationen, deren Bodenannäherung eine Bedingung der Mission ist (Helikopter SAR-Mission, Terrain Following, Tiefflug). Hier können Höheninformationen, die im Gegensatz zur Realität zu hoch sind sicherheitskritische Fehlauskünfte liefern. Für solche Anwendungsfälle müssen die Anforderungen an das Datenmaterial so spezifiziert werden, daß eine Abbildbarkeit der Vorgaben möglich ist.

Hinsichtlich der Umsetzung der Anforderungen, die in den Dokumenten spezifiziert werden, sind daneben widersprüchliche Angaben problematisch. Betrachtet man beispielsweise das in Tabelle 3.6 durch die ICAO geforderte Konfidenzintervall, so wird dieses mit „*Confidence Level* $1\sigma = 90\%$ “ angegeben. Eine solche Angabe ist unklar bzw. doppeldeutig, da man entweder das Konfidenzintervall mit der Standardabweichung bei einem σ -Sigma (entspricht ca. 68%) oder aber mit 90% angibt.

Zusammenfassend gilt es festzustellen, daß die Spezifikationen zwar teilweise bereits in einer überarbeiteten Version vorliegen und Gültigkeit besitzen, ihre Angaben jedoch kritisch betrachtet und diskutiert werden müssen, bevor eine Implementierung der Daten in ein Gesamtsystem erfolgt. Ebenfalls gilt es, sorgfältig zu prüfen, ob die Spezifikationen bedingungslos auf die gewünschte Applikation angewendet werden können oder ob Abweichungen letztendlich einen Sicherheitsgewinn darstellen können.

3.2 Geländewarnsysteme (TAWS)

Geländewarnsysteme sind bereits seit 1974 in den USA für kommerzielle Luftfahrzeuge durch die FAA vorgeschrieben. Seit 1978 gilt die ICAO-Vorschrift, daß alle Flugzeuge mit einem maximalen Startgewicht von mehr als 15.000 kg oder einer Kapazität von mehr als 30 Passagieren mit Geländewarnsystem ausgerüstet sein müssen [KR99]. So konnte durch den frühen Einsatz von Geländewarnsystemen der ersten Generation, dem GPWS (Ground Proximity Warning System), die Anzahl von CFIT-Unfällen deutlich vermindert werden [May01].



Abbildung 3.3: Darstellung eines Geländewarnsystems (TAWS) [FLY07]

Die in einem GPWS verarbeiteten Informationen basieren auf der Auswertung der Radiohöhe, der barometrischen Sinkrate, der Gleitpfadabweichung sowie der Konfiguration des Luftfahrzeuges, wobei hier die Fahrwerk- und die Landeklappenposition betrachtet werden [Men00]. Allerdings weist dieses System einen wesentlichen Mangel auf, da es keinerlei Informationen über das vorausliegende Gelände bereitstellen kann. Die einzige Information

hinsichtlich einer Geländeannäherung wird von dem senkrecht nach unten blickenden Radiohöhenmesser geliefert [May01].

Um diesen Nachteil auszugleichen, sind unter dem Oberbegriff „Terrain Awareness and Warning System“ (TAWS) Warnsysteme entwickelt worden, die auf Geländedatenbanken zugreifen und das räumliche Situationsbewußtsein erhöhen sollen. Sollte eine Gefährdungslage vorliegen, wird dem Piloten eine Warnung nicht nur akustisch mitgeteilt, sondern der Konflikt wird auch graphisch auf dem Navigationsdisplay (ND) dargestellt (siehe Abbildung 3.3) [Juk04]. Die sofortige Reaktion auf eine TAWS-Warnung ist ein vertikales oder horizontales Ausweichmanöver, um eine Kollision mit dem Hindernis vermeiden zu können. Die Anforderungen an ein TAWS sind in der „Technical Standard Order TSO-C151a“ [FAA02] festgelegt. Die dort verfaßte allgemeine Forderung beinhaltet, daß ein TAWS der Cockpitbesatzung genügend Informationen zur Verfügung stellen wie auch über entsprechende Warnhinweise verfügen muß, um gefährliche Annäherungen an das Gelände effektiv verhindern zu können.

Die wohl bekanntesten und am weitesten verbreiteten Systeme sind das EGPWS (Enhanced Ground Proximity Warning System) von Honeywell Aerospace und das T²CAS (Terrain and Traffic Collision Avoidance System) von ACSS, welches ein Aircraft Collision Avoiding System (ACAS) mit einem Ground Collision Avoiding System (GCAS) kombiniert. Neben den hier genannten gibt es eine Vielzahl weiterer TAWS Produkte für den militärischen und zivilen Markt, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll.

3.2.1 T²CAS

Das von der ACSS angebotene T²CAS steht für „Terrain and Traffic Collision Avoidance System“ und vereint die Funktionalität von TAWS und einem TCAS. Die Geländewarnungsfunktion des T²CAS beinhaltet gegenüber seinem Vorgänger, dem TCAS 2000, eine verbesserte Geländekonfliktvorhersage, basierend auf Vermeidungsalgorithmen. Des weiteren wird eine Ausstattung zur Anzeige von Konflikten angeboten, wie sie bei früheren TAWS Produkten nicht möglich war [Acs07].

Das Geländewarnsystem im T²CAS ist eine autonome Funktion, die durch das Ground Collision Avoidance Module (GCAM) übernommen wird, welches durch ein prädikatives Warnen vor CFIT Unfällen schützen soll. Optional können ein Hinderniswarnsystem wie auch ein Schutz vor Scherwinden hinzugefügt werden [Acs07].

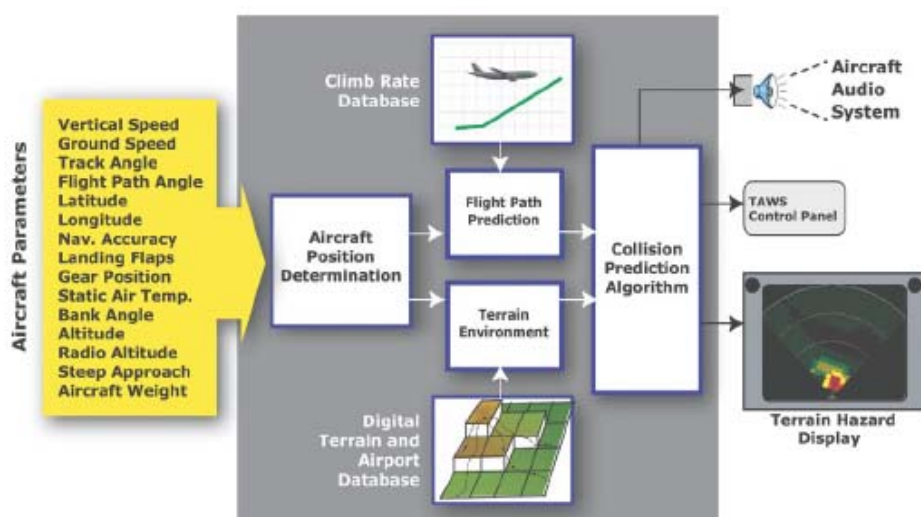


Abbildung 3.4: Funktionsweise des T²CAS Geländewarnmoduls CPA [Acs07]

Wie in der TSO-C151a gefordert, beinhaltet das GCAM sowohl eine prädiktive wie auch reaktive Warnfunktion. Dies wird durch eine CPA (Collision Prediction & Alerting) Funktion

sichergestellt, welche eine Gelände- wie auch Flughafendatenbank wie auch ein Modell der Steigmöglichkeit des Flugzeuges umfaßt. Die CPA berechnet potentielle Gefährdungen aufgrund von Geländekonflikten und generiert schließlich akustische wie auch visuell-graphische Warnungen. Mit Hilfe des CPA angemessen auf eine Bedrohung reagieren zu können, stellt somit ein zentrales Element des GCAM dar. Die Funktionsweise des CPA im T²CAS kann Abbildung 3.4 entnommen werden [Acs07].

Die im T²CAS verwendeten Datenbanken basieren auf Gelände- und Flughafeninformationen. Die Geländedatenbank weist eine weltweite Deckung auf und ist im geographischen Koordinatensystem WGS84 abgelegt. Die Auflösung der Geländedaten variiert von 2 Bogenminuten in reinen Enroute-Bereichen bis hin zu 30 Bogensekunden für den Bereich der Terminal Area, d.h. den Bereich des An- und Abfluges um einen Flughafen herum (ca. 21 Nm \approx 40 km vom ARP). Für einige Flughäfen in bergigen Regionen wird der Stützstellenabstand des Geländeasters in einem Bereich von ca. 11 km um den ARP herum auf 15 Bogensekunden reduziert. Ebenfalls werden Flughafeninformationen für alle Flugplätze mit einer Start- und Landebahn mit einer Länge von mehr als 3500 Fuß in der Datenbank abgelegt [Acs07].

3.2.2 EGPWS

Das von Honeywell Aerospace angebotene EGPWS - Enhanced Ground Proximity Warning System - wird seit 1996 in kommerzielle Flugzeuge eingerüstet. Dieses Warnsystem beinhaltet die von der ICAO geforderte GPWS Funktionalität in vollem Maße und kann dieses somit vollständig ersetzen. Die grundlegende Verbesserung des EGPWS gegenüber dem herkömmlichen GPWS besteht in einer Prädiktion des zukünftigen Flugpfades und damit einhergehender potentieller Geländekonflikte. Dies wird dadurch erreicht, daß, basierend auf der geographischen Länge und Breite des Flugzeuges, der Drehrate, dem „Flight Path Angle“ und der Geschwindigkeit die Position des Fliegers in einer weltweiten Geländedatenbank bestimmt werden kann. Mit einem „Look-Ahead-Algorithmus“, bestehend aus einer horizontalen und vertikalen Komponenten, kann schließlich die Umgebung des Flugzeuges nach einer Gefährdung abgesucht werden. Sollte ein Konflikt zwischen dem errechneten Flugpfad und dem Gelände erkannt werden, gibt das System eine Warnung aus, wobei der Algorithmus so ausgelegt ist, daß Konflikte 60 Sekunden im voraus erkannt werden. Die Warnung erfolgt akustisch wie auch visuell. Der Geländekonflikt wird auf dem Navigationsdisplay angezeigt und somit eine räumliche Einordnung der Gefährdung von der Cockpitbesatzung sichergestellt [Hon07], [May01].

Die von dem Warnsystem verwendete Datenbank basiert zum einen auf Geländedaten mit einer Auflösung von 6 bis 30 Bogensekunden mit weltweiter Deckung, wobei die Genauigkeit der Daten mit steigender Entfernung zu einem Flughafen abnimmt. Als Referenz wird das geographische Koordinatensystem WGS84 verwendet. Um die notwendigen Informationen über die Lage von Flugplätzen bereitzustellen, sind in der Datenbank mehr als 12.000 Flughäfen mit 30.000 Start- und Landebahnen abgelegt. Des weiteren stehen Informationen über 108.000 Hindernisse zur Verfügung. Um die Aktualität des Systems sicherstellen zu können, werden Datenbanken- und Softwareupdates dreimal im Jahr zur Verfügung gestellt [Hon07].

3.3 Synthetische Sichtsysteme (SVS)

Durch Faktoren wie Tageszeit oder Wetterbedingungen kann die visuelle Wahrnehmung und somit die Einschätzung der das Flugzeug umgebenden Verhältnisse erheblich beeinflußt werden. Somit kann es mangels einer visuellen Außenreferenz dazu kommen, daß sich die Cockpitbesatzung unter Instrumentenflugbedingungen verstärkt auf die Cockpitanzeigen verläßt. Somit müssen Informationen, die unter Sichtflugbedingungen nur über eine

Interaktion mit der Außenwelt wahrgenommen oder zumindest verifiziert werden, alleine den Flugführungssystemen entnommen werden [KPB04].

Um diesen Defiziten entgegenzuwirken, wurden immer neue Geräte entwickelt, welche die Cockpitbesatzung unterstützen sollen. Somit hielten Systeme wie z.B. das Instrumenten-Landesystem (ILS), „Moving Map“ Anzeigen oder auch das TAWS Einzug in die Pilotenkanzel. Durch das Hinzukommen immer neuer bzw. zusätzlicher Informationen steigt jedoch im gleichen Maße die Arbeitsbelastung der Flugzeugführer, um sich einen vollständigen Eindruck der aktuellen Situation zu verschaffen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde das SVS (Synthetic Vision System) Konzept entwickelt [KPB04].

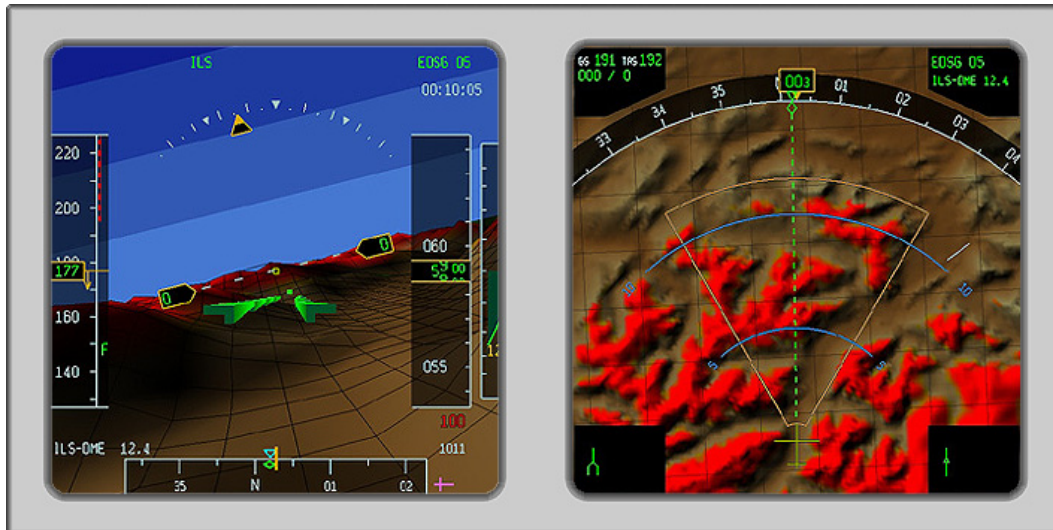


Abbildung 3.5: SVS mit GCAS - Ground Collision Avoidance System (TUD)

Synthetic Vision Displays bieten prinzipiell zwei verschiedene Ansichten in Bezug auf das Gelände. Zum einen kann die Geländeansicht in Form einer Kartenansicht, d.h. senkrecht von oben z.B. auf dem Navigationsdisplay (ND), realisiert werden, zum anderen kann die Darstellung perspektivisch, 2½- bzw. 3-dimensional, z.B. auf dem PFD (Primary Flight Display) erfolgen [May01]. Abbildung 3.5 zeigt beispielhaft ein SVS in ebener bzw. perspektivischer Darstellung. Neben der Orientierungsinformation kann durch eine entsprechende Farbgebung eine Warninformation ähnlich einem TAWS in den Displays implementiert werden, die das Situationsbewußtsein über potentielle Gefahren erhöht.

Zusätzlich zu der Darstellung von Geländeinformationen kann eine Vielzahl zusätzlicher Informationen in einem SVS abgebildet werden [Wie06] [Pur00].

- Prädiktion – Vorausberechnung der Flugbahn
- Flugpfade – „Tunnel in the Sky“
- Hindernisse - Obstacles
- Flughäfen - AMDB

Somit wird das SVS für alle Flugphasen nutzbar. Allerdings hängt die Nutzbarkeit eines SVS neben der graphischen Darstellung auf dem Display auch von der Auflösung und Integrität der Datenbanken wie auch der Qualität der Navigationssysteme zur Positions- und Lagebestimmung ab. Diese Verknüpfung aus Navigation, Datenbanken und Darstellung kann als das grundlegende Konzept von SVS Anzeigen beschrieben werden (vgl. Abbildung 3.6) [MAY01].

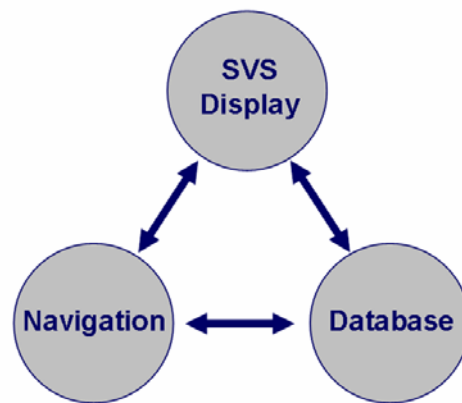


Abbildung 3.6: Systemkonzept von SVS Anzeigen [MAY01]

3.4 Luftfahrtkarten

In der Luftfahrt sind klassische Papierkarten zur Navigation nach wie vor von großer Bedeutung. Sie beinhalten Informationen über An- und Abflugverfahren, Enroutestrecken sowie spezielle Notfallverfahren. Das traditionelle „Route Manual“ bildet Karten ab, die mit einem Koordinatengitter überzogen sind, in dessen jeweiligen Quadranten ein für das darunter liegende Gelände maßgeblicher Höhenwert dargestellt wird (vgl. [Jep07]).

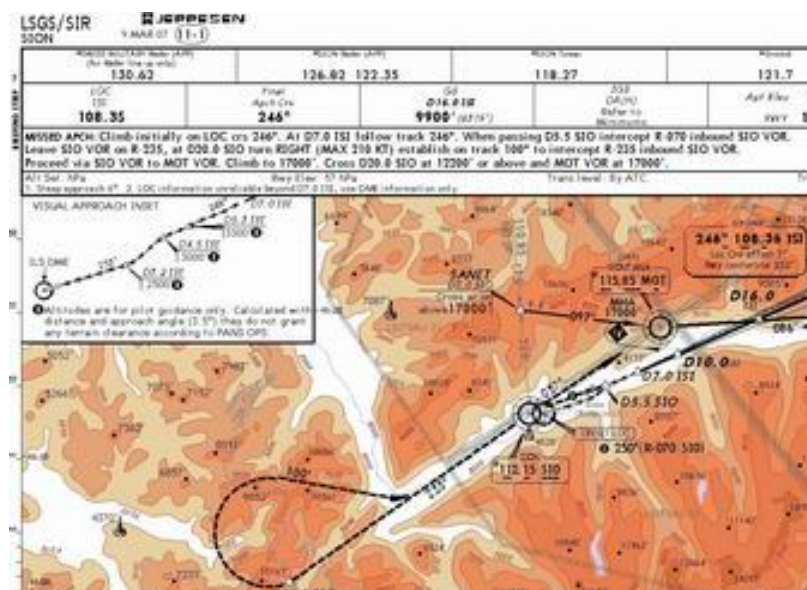


Abbildung 3.7: Ausschnitt aus einer Jeppesen Approach Chart (Sion)

Anhand dieses Höhenwertes hat der Pilot zu jeder Zeit eine zusätzliche Informationsquelle über die Höhen des unter ihm liegenden Geländes. Dies wird entsprechend den ICAO International Standards and Recommended Practices Annex 4, „*Aeronautical Charts*“, gewöhnlich aus einer Kombination von Höhenlinien, Farbverläufen, Markierungen für die höchsten Geländepunkte sowie einer Geländeschummerung dargestellt [ICA01].

Dies dient der Orientierung, der Identifikation von Gelände Hindernissen, dem sicheren Geländeüberflug sowie der kurzfristigen Flugwegeplanung. Abbildung 3.7 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus einer Jeppesen Approach Chart von Sion/Schweiz.

Heute werden Luftfahrtkarten nicht mehr manuell an einem Zeichenbrett erstellt. Auch verlieren CAD Systeme in der Herstellung von Luftfahrtkarten immer mehr an Bedeutung. Vielmehr werden Luftfahrtkarten mehr oder weniger automatisch aus einer aeronautischen

Datenbank heraus erzeugt. Dieses Herstellungsverfahren hat gegenüber den herkömmlichen Verfahren den großen Vorteil, daß aufgrund der beschränkten „Lebensdauer“ von vielen aeronautischen Daten (AIRAC-Cycle = 28 Tage) ein Aktualisieren der Daten nur einmal und zwar auf der Ebene der „Basis-Datenbanken“ vorgenommen werden muß (siehe Abbildung 3.8).

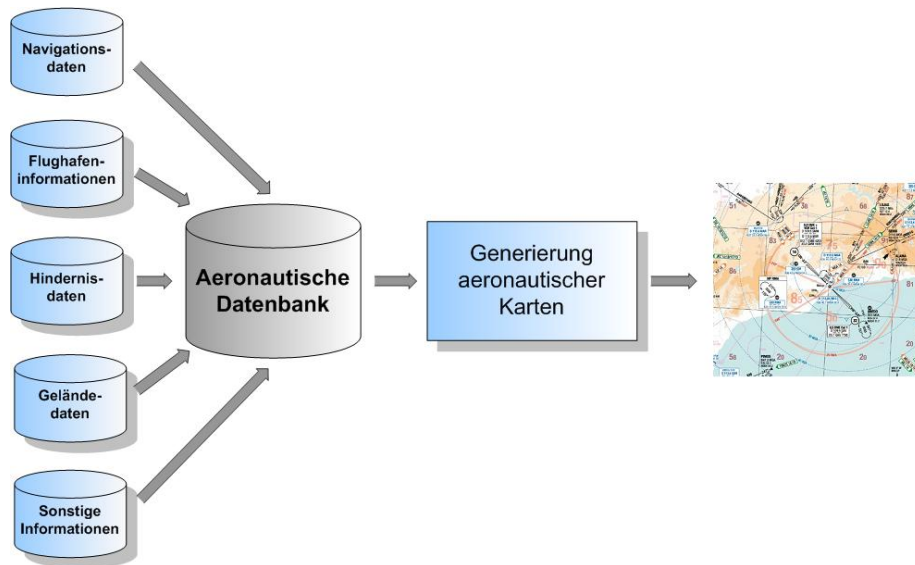


Abbildung 3.8: Generierung aeronautischer Karten

Die grundlegende Idee einer solchen Architektur ist es, aus einer Vielzahl von Informationsquellen (Basis-Datenbanken) eine für die Luftfahrt geeignete Datenbank zu erstellen, die alle für die Kartierung notwendigen Informationen bereitstellt.

Gespeist wird diese Datenbank zum einen aus Quellen mit rein aeronautischen Informationen (z.B. AIP, ARINC 424 etc.), aber auch geographische Informationen wie Geländehöhen, topographische Gegebenheiten sowie sicherheitskritische Hindernisse werden mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen (GIS) in die Datenbank überführt. Im Falle einer Aktualisierung von relevanten Informationen wird lediglich die eine Änderung in den Basisdaten vorgenommen, welche schließlich automatisch in die „Master-Datenbank“ überführt wird. Bei einer nun folgenden Generierung neuer Karten, werden alle Änderungen vollständig in den Produktionsprozeß übernommen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren werden die Änderungen nur einmal am Anfang der Produktionskette vorgenommen und nicht mehr wie bisher an den Karten selbst, die sich am Ende der Produktionskette befinden.

3.5 Geländedaten in der Verfahrensplanung

Die Flugphase eines Luftfahrzeuges wird hauptsächlich von den in Abschnitt 3.1, 3.3 und 3.4 dargestellten cockpitbasierten Applikationen unterstützt. Ein großer Anteil bei der Verwendung von Höheninformationen in der Luftfahrt liegt jedoch bei der Verfahrensplanung am Boden, wobei es hierbei oberstes Ziel ist, eine Kollision mit dem Gelände zu vermeiden. So ist eine Optimierung von Flugstrecken, An-, Abflug-, sowie von Notfallverfahren nur mit Unterstützung von Geländemodellen möglich [May01].

Wie auch bei den flugzeugseitigen Geländewarnsystemen sind Gebiete in unmittelbarer Flughafennähe von besonderer Bedeutung. Üblicherweise werden zum Instrumentenflug ausgestattete Flugzeuge beim Landevorgang von vielfältigen (Funk-) Navigationshilfen unterstützt, welche die Steuerung des Flugzeuges mit größter Präzision ermöglichen. Das Anflugverfahren, welches hierbei die niedrigsten Minima erlaubt, ist das Instrumenten-

3. 2 Anwendungsbereiche von Geländedaten in der Luftfahrt

Landesystem (ILS). Dieses sendet dem Piloten ein Signal für den zu fliegenden Kurs (Leitstrahl) und die zu fliegende Höhe (Gleitpfad) zu [Hee75].

Klassische Hilfsmittel der Instrumentennavigation sind unter anderem Funkfeuer des Typs VOR (Very High Frequency Omnidirectional Radio Range) und NDB (Nondirectional Beacon). Modernere Verfahren sind Flächennavigationen nach dem Funknavigationssystem Loran-C (**Long Range Navigation**) oder auch dem satellitengestützten GPS.

Die auf diesen Hilfsmitteln basierende Verfahrensplanung stützt sich auf den von der Internationalen Zivilluftfahrt Organisation ICAO vorgegebenen Vorschriften [ICA93], welche sich u.a. auf die Maßgaben für die einzuhaltenden Mindestflughöhen beziehen, die sich je nach Flugphase unterscheiden. Um den Flugpfad vorgeben zu können, ist also ein Kenntnis des zu überfliegenden Geländes notwendig. Weitere Grundlage für die Verfahrensplanung sind neben einem exakten Geländemodell auch die Verfügbarkeit von Hindernisdaten [ICA93] [ICA99].

Schließlich können aus diesen Informationen minimale Sicherheitshöhen abgeleitet werden, welche für einen sicheren Flugbetrieb möglichst nicht unterschritten werden sollten.

4 Konzeption zur Qualitätssteigerung von Geländedaten

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, besteht in der Luftfahrt ein steigender Bedarf an Höheninformationen mit einem hohen Maß an Integrität und Qualität mit möglichst globaler Verfügbarkeit. Während mit Hilfe von Techniken der Fernerkundung aus dem Weltraum heute nahezu flächendeckende Geländedatensätze erzeugt werden können, bleibt die Frage nach deren uneingeschränkter Anwendbarkeit in der Luftfahrt offen. Vergleicht man beispielsweise die Anforderungen der RTCA hinsichtlich der Qualität eines Geländedatensatzes [RTC05a] mit den Produktspezifikationen der DLR SRTM X-SAR und NASA SRTM SIR-C DTED2 Höhenmodelle [DLR07] [NAS07] wird deutlich, daß beide für die Luftfahrt attraktiven Datensätze ohne korrigierende Maßnahmen nur bedingt als Geländereferenz einer zivilen Flugzeugmission geeignet sind.

Wenngleich heute durchaus Technologien existieren, die es gestatten, Datensätze höherer Qualität zu erzeugen, ist oftmals eine weltweite Nutzung nicht möglich. Auch muß immer die Frage nach der Wirtschaftlichkeit in Anbetracht des Nutzens der Systeme aufgeworfen werden.

Vor diesem Hintergrund scheint es notwendig, ein Verfahren zu entwickeln, welches eine Manipulation bereits vorhandener Datenquellen erlaubt, um den in der Luftfahrt definierten Anforderungen gerecht zu werden.

Da sich die in der Luftfahrt existierenden Anforderungen an Geländedaten von denen terrestrischer Anwendungen bezüglich ihrer Repräsentationsform oftmals unterscheiden (siehe Abschnitt 2.1), müssen spezielle Methoden entwickelt werden, um solche Höheninformationen hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit in der Luftfahrt zu bewerten. Wurden beispielsweise die SRTM SAR-X Höhendaten bereits bezüglich ihrer Eignung als DGM ausgiebig untersucht [RT02] [KHL02], bleibt eine verlässliche Bewertung dieses Datensatzes als Datengrundlage zur Erstellung eines DOM bislang aus.

Während jedes Anwendungsgebiet bzw. sogar jede Flugphase Anforderungen an eine bestimmte Datenqualität erfordert, sind in dieser Hinsicht den für die Luftfahrt zur Verfügung stehenden Datenquellen oftmals Grenzen gesetzt. Zwar stehen grundsätzlich Geländedaten für Luftfahrtanwendungen zur Verfügung, allerdings weisen diese in vielerlei Hinsicht Unzulänglichkeiten auf. Mängel resultieren zum einen aus der Tatsache, daß bei Höheninformationen, die aus dem All gewonnen werden, weite Gebiete nur sehr lückenhaft bis gar nicht abgebildet werden können [HFB05]. Zum anderen steht die gewünschte Repräsentationsform des Geländemodells (DGM bzw. DOM) oft nicht eindeutig zur Verfügung, sondern liegt als Mischform vor [HEK05].

Das Füllen von Datenlücken soll in dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden, insofern sich dieser Themenkomplex primär mit der Identifizierung von alternativen Datenquellen bzw. Verfahren zu deren Erzeugung beschäftigt und diese wiederum ihrerseits hinsichtlich einer Eignung in der Luftfahrt zu prüfen wären [EHK07].

Ziel ist es vielmehr, eine Methode zur Anpassung eines grundsätzlich für die Luftfahrt zur Verfügung stehenden und geeigneten Datensatzes (z.B. SRTM Radarhöhendaten) zu entwickeln, um den in der Luftfahrt üblichen Anwendungsgebieten zu genügen. Dabei sollen nach einer detaillierten Fehleranalyse eines Höhenmodells die Daten so manipuliert werden, daß sie verschiedenen Anwendungsgebieten gerecht werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, in einem ersten Schritt die Güte eines Höhendatensatzes zu ermitteln. Hierzu werden aussagekräftige Indikatoren bestimmt, die eine objektive Einschätzung des Datensatzes erlauben und Aufschluß über die Eignung und Nutzbarkeit für einen bestimmten Anwendungsfall geben. Eine entsprechende Bewertung kann durch einen Abgleich der Daten mit Hilfe von Kontrollpunkten oder auch ganzen

Datensätzen geschehen. Davon ausgehend kann darüber entschieden werden, ob eine Erhöhung der Datenqualität angestrebt werden muß oder nicht. Sollte dies notwendig sein, wird in einem nächsten Schritt ein „Safety Buffer“ bestimmt, der eine Sicherheitsmarge auf den Datensatz legt, um schließlich die gewünschte Genauigkeit zu erreichen. Diese Vorgehensweise wird nachfolgend genauer beschrieben.

4.1 Parameter zur Bewertung digitaler Höhenmodelle

Um eine Aussage über die Eignung eines Geländedatensatzes für ein bestimmtes Anwendungsgebiet vornehmen zu können, ist eine objektive und vergleichbare Auswertungsmethodik der in Abschnitt 4.5.1 und 4.5.2 beschriebenen Analyseverfahren notwendig. Aus diesem Grund bedarf es einer Auswahl an Indikatoren und Parametern, die eine sichere Einschätzung der betrachteten Höheninformationen zulassen. Die im Rahmen dieser Untersuchung ausgewählten Parameter zur Bewertung des Gütegrades werden im Folgenden genauer beschrieben.

4.1.1 Qualität

Nach der „International Organization for Standardization“ (ISO), in welcher Deutschland durch das „Deutsche Institut für Normung e.V.“ (DIN) vertreten ist, wird in der Norm DIN EN ISO 9000:2005 Qualität als der Grad beschrieben, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt. Inhärent bedeutet in diesem Fall das einem Produkt innewohnende ständige Merkmal. Die Qualität gibt demnach an, in welchem Maße ein Produkt (Ware oder Dienstleistung) den definierten Anforderungen entspricht. Entscheidend für die Qualität eines Produktes ist nach ISO 9000 nicht der Preis oder die Güte (z.B. verwendete Materialien), sondern vielmehr, ob die gestellten Anforderungen an das Produkt erfüllt werden [ISO05].

Dieser Definition folgend, soll in der vorliegenden Arbeit der Begriff Qualität als Maß dienen, inwieweit die untersuchten Höhendatensätze den durch die RTCA bzw. ICAO vorgebenden Anforderungen genügen, die in Tabelle 3.2 bis Tabelle 3.6 beschrieben werden.

Resümierend gilt auch im Kontext dieser Arbeit, daß die Qualität eine zusammenfassende Bewertung darstellt, inwieweit die vorgegebenen (numerischen) Anforderungen durch das Produkt (Höhendaten) erfüllt werden.

Da nicht alle durch die RTCA und ICAO spezifizierten Anforderungen im Rahmen dieser Arbeit hilfreich bzw. notwendig sind, um die Qualität eines Datensatzes festzustellen, sondern vielmehr zusätzliche Parameter benötigt werden, sollen nachfolgend alle in dieser Untersuchung Anwendung findenden Qualitätsindikatoren genauer beschrieben werden.

4.1.2 Integrität

Der Begriff Integrität kann als Qualitätsindikator in verschiedenen Zusammenhängen bei der Nutzung aeronautischer Daten Anwendung finden. Insgesamt können drei Arten von in der Luftfahrt gebräuchlichen Formen der Integrität unterschieden werden:

Eine Form der Integrität bei der Verwendung von aeronautischen Daten ist die *Systemintegrität*. Diese beschreibt den Grad des Vertrauens, den man in die Funktion eines Systems setzen kann. Hier definiert Integrität die Wahrscheinlichkeit, daß der Nutzer eine Überschreitung eines maximal zulässigen Fehlers oder auch die Einschränkung oder den Ausfall einer Funktion nicht bemerkt. In diesem komplexen Zusammenhang stellt die Datenbank nur eine einzelne Komponente des Gesamtsystems, bestehend aus Sensorik, Hardware, Software etc., dar.

Die geforderte Systemintegrität kann durch ein „Functional Hazard Assessment (FHA)“ nachgewiesen werden. Solch ein Prozeß identifiziert die Risiken und Fehlermöglichkeiten des Systemdesigns mit den dazugehörigen Datenbanken. Mit einer entsprechenden Fehlerabschätzung ist die Identifikation der notwendigen Verringerung der Störanfälligkeit

möglich, um schließlich die geforderte Systemintegrität sicherzustellen. [RTCA05a] [RTCA98].

Bei der Betrachtung der Systemintegrität wird deutlich, daß die verwendeten Datenbanken nur einen Teil eines komplexen Gesamtsystems darstellen und demnach ihr Einfluß auf den Ausfall einer Funktion nur unter Berücksichtigung der gesamten Systemarchitektur wie auch eines speziellen Anwendungsfalles bestimmt werden kann. Da in der hier durchgeführten Untersuchung die Bewertung der verwendeten Höhendaten systemunabhängig durchgeführt wird, soll auf die Systemintegrität nicht weiter eingegangen werden.

Eine weitere in der Luftfahrt relevante Form der Integrität stellt die *Datenintegrität* dar. Dieser Parameter repräsentiert ein Qualitätsmaß, welches die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der ein einzelnes Datum seit der Erstellung unbeabsichtigt verändert oder gelöscht wurde (vgl. Abschnitt 3.1.1.2) [RTCA98]. Dieser Qualitätsindikator beschreibt demnach nicht die Vergleichbarkeit der abgebildeten Daten mit den tatsächlichen reellen Informationen (z.B. Lagegenauigkeit), vielmehr wird hier der Informationsverlust quantifiziert, der bei der Verteilung wie auch der Prozessierung der Daten entsteht. Die Datenintegrität stellt somit keinen Qualitätsparameter dar, der eine Aussagekraft im Rahmen dieser Untersuchung anbietet, da beispielsweise ein Datensatz mit einer sehr geringen Lageungenauigkeit eine sehr hohe Datenintegrität aufweisen kann.

Eine dritte und für diese Arbeit relevante Form der Integrität stellt das *Konfidenzintervall* dar (vgl. Abschnitt 3.1.1.2). Das Konfidenzintervall (*Confidence Level*) gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der Fehler in einer Datenbank innerhalb ihrer spezifizierten Grenzen auftreten. Üblicherweise werden diese Grenzen als linearer oder zirkulärer Fehler angegeben. Der zirkuläre Fehler wird nur zur Beschreibung von horizontalen Werten einer Datenbank verwendet, soweit zwei Dimensionen die Ebene beschreiben. Für den linearen Fall werden die Grenzen als der Mittelwert einer Datenbank, plus oder minus der spezifizierten Genauigkeit des Datensatzes für vertikale Fehler, beschrieben. Für den zirkulären Fall werden die Grenzen als der Genauigkeitsradius angegeben. Das Konfidenzintervall eines Positionswertes muß stets angegeben werden. Die Angabe dieses Wertes erfolgt bevorzugt als Prozentzahl [RTC05a].

Basierend auf den hier durchgeführten Definitionen soll im Folgenden der Begriff „Integrität“ das für die Darstellung der Lagegenauigkeit notwendige Konfidenzintervall beschreiben.

4.1.3 Genauigkeit

Die Genauigkeit (*engl. Accuracy*) wird nach [RTC05a] in eine vertikale und eine horizontale Komponente unterteilt und wie folgt definiert:

„Die Genauigkeit ist ein Maß der Übereinstimmung zwischen einem geschätzten oder gemessenen Wert und dem wahren Wert. Für gemessene Positionen wird die Genauigkeit als Entfernung angegeben, in deren Umkreis von der angegebenen Position die wahre Position mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit fällt. Die horizontale Genauigkeit muß in denselben Einheiten angegeben werden wie der Höhenwert.“

Da sich die in der vorliegenden Untersuchung durchgeführten Analyseverfahren auf die Bestimmung der vertikalen Genauigkeit beschränken (vgl. Abschnitt 4.5), beschreibt der Begriff „Genauigkeit“ im Folgenden die vertikale Abweichung zwischen den in der zu untersuchenden Datenbank aufgezeichneten Werten und denen der Referenzdaten.

Da Genauigkeitsanforderungen für Positionsdaten im Luftfahrtbereich mit einem Konfidenzintervall (Vertrauensintervall) beschrieben werden, muß dieses stets mit den Genauigkeitsanforderungen angegeben werden. Für die hier betrachtete vertikale Genauigkeit kann das Konfidenzintervall als LEP (Linear Error Probability) beschrieben werden. Dieses wird durch [RTC05a] und [ICA04] auf 90% festgelegt (vgl. Abschnitt 3.1.1.3 und 3.1.2.3).

Basierend auf diesen Festlegungen beschreibt der Begriff „Genauigkeit (90%)“ in den nachfolgenden Analysen die vertikale Lagegenauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90%.

4.1.4 Mittlere Abweichung

Ein weiterer in dieser Arbeit verwendeter Qualitätsparameter stellt die mittlere Abweichung dar. Dieser Wert beschreibt den Mittelwert der Differenz der zu verifizierenden Höhenwerte von jenen der Referenzhöhendaten und wird über das arithmetische Mittel ermittelt. Das arithmetische Mittel (Durchschnitt) ist ein rechnerisch bestimmter Mittelwert und definiert sich wie folgt [Gru98]:

$$\bar{x}_{arithm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (4.1)$$

Die Zufallsvariablen x_1 bis x_n sind unabhängig und identisch verteilt.

4.1.5 Standardabweichung

Weiterhin soll zur Bewertung der untersuchten Geländemodelle die Standardabweichung der ermittelten Differenzen bestimmt werden. Die Standardabweichung ist ein Maß dafür, wie weit die jeweiligen Werte einer Stichprobe um ihren Mittelwert (Durchschnitt) streuen. Die Standardabweichung σ wird als die positive Wurzel der Varianz σ^2 definiert. Nach [Bar92] definiert sich die Standardabweichung wie folgt:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

4.2 Erstellung eines „Safety Buffers“

Die Idee des „Safety Buffers“ beruht auf der Tatsache, daß die Qualität von Geländedaten durch die vertikale und horizontale Lagegenauigkeit der Höhenwerte beschrieben wird und zu jeder Genauigkeitsangabe auch das entsprechende Konfidenzintervall angegeben werden muß (siehe 3.1.1.2). Das Konfidenzintervall kann als die „innere“ Integrität eines Datensatzes verstanden werden und definiert die zu erwartende Menge der einzelnen Höhenwerte, die die geforderten Genauigkeiten einhalten können. Wird beispielsweise, wie durch die ICAO oder die RTCA, für Area 2 eine vertikale Genauigkeit von 3 m bei einem Konfidenzintervall von 90% gefordert, bedeutet dies, daß lediglich 10% der Werte um mehr als 3 m von dem abgebildeten reellen Geländeabschnitt abweichen dürfen. Hierbei ist dem Fehler wiederum keine Grenze gesetzt und es ist unerheblich, ob die Werte die vorgegebenen Anforderungen um einen oder um 100 Meter verfehlen. Durch diese Tatsache wird deutlich, daß die Qualität eines Datensatzes letztlich hauptsächlich durch die Konfidenzintervalle geprägt wird. Dieser Sachverhalt soll schließlich genutzt werden, um eine Qualitätssteigerung eines Datensatzes zu erreichen.

In einem ersten Analyseschritt soll ermittelt werden, welche Genauigkeit ein Höhendatensatz eines bestimmten Geländeabschnittes unter einem vorgegeben Konfidenzintervall tatsächlich aufweist. Auf der Basis dieses Ergebnisses kann schließlich analysiert werden, wie die tatsächliche Verteilung der Abweichungen zu einer Referenz aussieht. Mit diesem Arbeitsschritt wird gleichsam der Ist-Zustand der „inneren“ Integrität eines Datensatzes bestimmt.

In einem nächsten Schritt erfolgt die Anpassung der Genauigkeit eines Datensatzes, basierend auf der Addition einer Sicherheitsmarge. Dies wird dadurch erreicht, daß die Höhendifferenz zwischen dem tatsächlichen Höhenfehler bei einem vorgegebenen Konfidenzintervall mit dem des geforderten Fehlers berechnet wird.

Schließlich wird diese Differenz als Sicherheitsmarge, dem „Safety Buffer“, auf die Höhenwerte des Geländedatensatzes aufaddiert und somit die Höheninformationen einer Datenbank um den Wert erhöht, der statistisch zur Erreichung des Sollwertes fehlt (siehe Abbildung 4.1).

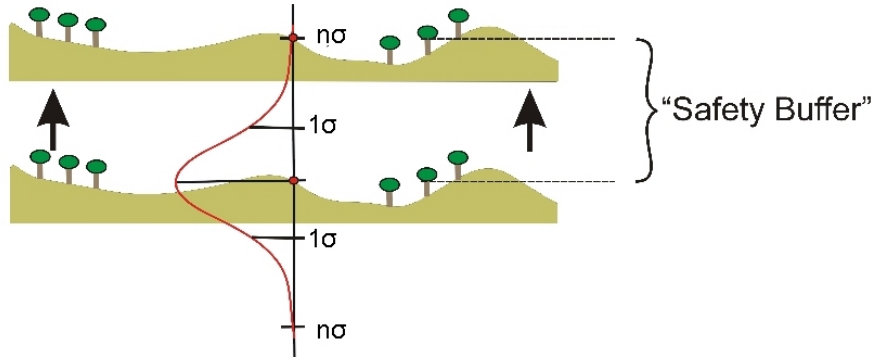


Abbildung 4.1: Prinzip des „Safety Buffers“

Dabei bedarf es jedoch einer grundsätzlichen Annahme, um das vorgestellte Prinzip des Addierens einer Sicherheitsmarge anwenden zu können. Die Abgrenzung der Anwendbarkeit wird nachfolgend genauer beschrieben.

4.2.1 Abgrenzung der Anwendbarkeit

Das vorgestellte Verfahren bedarf einer grundlegenden Annahme, um in der zuvor skizzierten Form zu einer sinnvollen Anwendung zu kommen. Bei der Bestimmung des Konfidenzintervalls eines Datensatzes wird davon ausgegangen, daß nur die Werte für Flugoperationen von sicherheitskritischer Relevanz sind, die in der Datenbank niedriger abgebildet sind, als man sie in der Wirklichkeit vorfindet. Höheninformationen, die als überhöht abgespeichert werden, sind zwar inkorrekt, können aber als unkritisch angesehen werden. Auf dieser Annahme beruhend, kann schließlich das Konfidenzintervall innerhalb einer Geländedatenbank auf der Basis der kumulierten relativen Häufigkeit (auch empirische Verteilungsfunktion genannt) bestimmt werden. Hierunter ist der Anteil derjenigen Merkmalsausprägungen (Fehlergrößen) zu verstehen, die gleich oder kleiner einer bestimmten Ausprägung (Fehlerrgrenze) sind. Diese läßt sich nach [Voß04] durch

$$F_i = \sum_{j=1}^i f'_j \text{ mit } i=1,2,\dots,k \quad (4.3)$$

berechnen, wobei

$$f'_i = \frac{f_i}{n} \text{ mit } f_i = \text{absolute Häufigkeit} \quad (4.4)$$

die relative Häufigkeit ausdrückt.

Diese Abgrenzung hat zur Folge, daß die Korrektur der Daten nur in eine Richtung erfolgen kann. Höhenwerte, die in einer Datenbank als zu hoch identifiziert worden sind, werden nicht durch einen Abzug des Fehlers den Höhen in der Realität angenähert, sondern es wird durch die Addition des „Safety Buffers“ die Differenz sogar vergrößert.

Für Luftfahrtanwendungen bzw. Flugphasen, bei denen es Ziel ist, eine unmittelbare Annäherung an den Boden zu vermeiden, kann dieser Ansatz durchaus einen Gewinn an Sicherheit darstellen. Es kann eine Zunahme der Betriebssicherheit eines Luftfahrzeuges,

insbesondere während des Reisefluges, aber auch in den Phasen des Sink- bzw. des Steigfluges, erreicht werden. Diese Flugphasen werden durch die ICAO wie auch durch die RTCA in der zivilen Luftfahrt als Area 1 bzw. Area 2 beschrieben (vgl. Abschnitt 3.1).

Kritisch hingegen ist der vorgestellte Ansatz zur Modifikation von Höheninformationen, wenn es zu einer notwendigen und zielgerichteten Annäherung an das Gelände kommt. Dies können zum einen Landemanöver auf einem Flughafen sein, die in [RTC05a] durch die Area 3 beschrieben werden. Hier vermag eine zu tiefe Abbildung der Landebahn zu einem problematischen Abfangmanöver und somit einer Gefährdung des Flugzeuges führen.

Auch für Landevorgänge im offenen Gelände, wie sie bei Helikopter SAR Einsätzen durchaus üblich sind oder bei einem bodennahen Operieren, wie es beim militärischen Tiefflug oder dem „Terrain Following“ Anwendung findet, kann dieses Verfahren zu einem nachteiligen Effekt führen. Zwar kann auch hier einer ungewollten Kollision mit dem Boden vorgebeugt werden, doch andererseits wird durch die Überhöhung der Höheninformationen ein Missionsziel, beispielsweise das Unterfliegen des Radars, nicht immer gewährleistet.

Somit zeigt sich, daß die Addition eines „Safety Buffers“ einen Gewinn an Sicherheit bedeuten kann, sofern das hauptsächliche Anwendungsgebiet zur Vermeidung einer ungewollten Annäherung an das Gelände dient.

Aus diesem Grund soll zur Verifizierung des vorgestellten Konzeptes zur Anpassung von Geländedaten an bestimmte Anforderungen einer Luftfahrtanwendung ein Szenario definiert werden, das dem Potential dieses Verfahrens gerecht wird.

4.2.2 Szenario zur Verifizierung des Verfahrens

Für die Verifizierung des vorgestellten Konzeptes des „Safety-Buffers“ muß ein Szenario gesucht werden, welches sowohl den beschriebenen Einschränkungen des Verfahrens gerecht wird, zugleich aber solch klare numerischen Anforderungen beinhaltet, daß die Umsetzung und Nutzbarkeit des Verfahrens überprüft werden kann. Geeignet für ein solches Szenario sind die in [RTC05a] und [ICA04] formulierten Anforderungen an Geländedaten. Zum einen werden die numerischen Anforderungen systemunabhängig formuliert, zum anderen werden in diesen Spezifikationen alle charakteristischen Flugphasen berücksichtigt. Durch die Abgrenzung der Anwendbarkeit des Verfahrens ist ersichtlich, daß von den vier beschriebenen Bereichen nur Area 1 und 2 zur Verifizierung des Konzeptes herangezogen werden können. In diesen Flugphasen gilt es in jedem Fall eine Berührung mit dem Gelände zu vermeiden, während für Area 3 und Area 4 ein kontrollierter Bodenkontakt des Flugzeuges vorgesehen ist.

Wie in Abschnitt 3.1.1.3 und 3.1.2.3 beschrieben, sind die numerischen Anforderungen an Geländedaten während des Reisefluges (Area 1) eines zivilen Flugzeuges mit einer vertikalen Genauigkeit von 30 m und einem Konfidenzintervall von 90% im Vergleich zu denen des An- und Abflugbereiches (Area 2) mit einer vertikalen Genauigkeit von 3 m bei einem Konfidenzintervall von 90% eher als gering zu erachten. Um das Konzept des „Safety Buffers“ auch für Generierungsmethoden verifizieren zu können, welche die Anforderungen der Area 1 leicht befriedigen können, soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Überprüfung und Anpassung der Daten hinsichtlich ihrer Nutzung für diejenige Flugphase vorgenommen werden, in der sich das Flugzeug dem Boden annähert, jedoch eine Kollision auf jeden Fall vermieden werden soll.

Somit werden die im Folgenden vorgestellten Analysen und Verfahren stets im Hinblick auf die durch Area 2 beschriebenen Anforderungen an Geländedatenbanken durchgeführt. Dennoch sollen die Ergebnisse der Untersuchungen so dargestellt werden, daß die Anwendbarkeit auch auf andere Szenarien übertragen werden kann, solange die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Abgrenzungen und Einschränkungen berücksichtigt werden.

4.3 Untersuchte Geländemodelle

Im Rahmen der Arbeit sollen Geländemodelle untersucht werden, die für den Einsatz in der Luftfahrt sinnvoll und angemessen sind. Hierbei können nicht alle auf dem Markt befindlichen Produkte betrachtet werden. Vielmehr soll anhand einer Auswahl von drei, auf unterschiedlichen Technologien basierenden Erzeugnissen, ein Verfahren evaluiert werden, welches eine Bewertung und Verbesserung von Höheninformationen zulässt.

Aus diesem Grund sollen zur Realisierung des Vorhabens zwei Geländemodelle untersucht werden, die mit Hilfe der Radarvermessung gewonnen wurden. Des weiteren soll ein Geländemodell betrachtet werden, welches mit einem flugzeuggestützten Laser-Scanner (LIDAR) erzeugt wurde.

Um schließlich eine aussagekräftige Bewertung der Datensätze vornehmen zu können, bedarf es hochgenauer Referenzdaten. Hierzu wurden ein mit photogrammetrischen Methoden erstelltes DOM sowie ein DGM herangezogen. Die ausgewählten Geländemodelle sollen im Folgenden genauer beschrieben werden.

4.3.1 SRTM SAR-X und SIR-C Geländemodelle

Bis zu Beginn dieses Jahrhunderts war das Datenprodukt „GTOPO30“ das global verfügbare Höhenmodell mit der höchsten Auflösung und Genauigkeit. Dabei handelt es sich um ein digitales Höhenmodell mit einer horizontalen Auflösung von 30 Bogensekunden (~ 1 km). GTOPO30 wurde aus verschiedenen Raster- und Vektordatenquellen generiert und im Jahre 1996 von der USGS (U.S.Geological Survey) fertiggestellt [USG07].

Zwischenzeitlich kam im April und Oktober 1994 in den Endeavour Shuttle Missionen erstmals die durch die USA, Deutschland und Italien entwickelten Spaceborne Imaging Radar (SIR-C) und Synthetic Aperture Radar (X-SAR) Ausrüstung zum Einsatz. Der erfolgreiche Einsatz der aus dem All operierenden Radarsysteme wurde schließlich in der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) fortgesetzt. Allerdings wurden die Radarsysteme nun interferometrisch betrieben, um Höhendaten im sogenannten „*Single Pass Verfahren*“ generieren zu können. Die amerikanische, deutsche und italienische Kooperation wurde schließlich im Jahr 2000 gestartet. Die Phase der Datengenerierung fand vom 11. bis 23. Februar statt. Mit diesem Vorhaben war es möglich, erstmals einen einheitlichen, globalen Datensatz digitaler Höhenmodelle der Erdoberfläche zwischen den Breitengraden 59° Süd und 60° Nord in hoher Auflösung zu erzeugen [DLR07] [NAS07].

Zwar standen schon vorher optisch-digitale Stereosysteme (wie SPOT oder IKONOS) zur Verfügung, aus denen sich sogar noch genauere Geländedaten ableiten ließen. Jedoch ist der Aufwand diese zu prozessieren und die Notwendigkeit, Paßpunkte aufzunehmen, unverhältnismäßig groß bzw. teuer und teilweise sogar unmöglich [Pau05].

Bei der SRTM Mission kamen wie bei der Endeavour Kampagne zwei Radarsysteme zum Einsatz. Das durch die DLR betriebene X-SAR-Radar arbeitete im X-Band (siehe 2.2.2) und generierte Daten mit einer Auflösung von einer Bogensekunde (~ 30 m) bei einer netzartigen Abdeckung eines 50 km breiten Streifen (siehe Abbildung 4.2).

Diese netzartige Abdeckung beruhte auf der Tatsache, daß der SAR-X Sensor nicht wie der SIR-C Sensor in einem Scan-Modus arbeitete. Allerdings konnten in der engeren Maschenweite des X-Bandes die Daten in einer höheren Auflösung aufgezeichnet werden.

Das von der NASA betriebene SIR-C System, welches im C-Band arbeitete, konnte aufgrund des Scan-Modus einen 225 km breiten Aufnahmestreifen mit einer flächendeckenden Abdeckung liefern. Die Auflösung des erzeugten Geländemodells beträgt wie bei den SAR-X Daten eine Bogensekunde. Allerdings steht für den zivilen Markt weltweit lediglich ein drei Bogensekunden Datenmodell zur Verfügung. Die Einbogensekundenvariante des C-Band Sensors ist nur für das Gebiet der Vereinigten Staaten frei erhältlich [DLR99] [NAS07].

4. 3BKonzeption zur Qualitätssteigerung von Geländedaten

Das global zur Verfügung stehende drei Bogensekunden Datenmodell (90 m Stützstellenabstand) basiert zu 100% auf dem um den Faktor 3 höher aufgelösten 30 m Raster. Um das 90 Meter Datenmodell zu erzeugen, wurden die 9 (3x3) ein Bogensekunden Pixel betrachtet, die unter dem zukünftigen 3 Bogensekunden großen Pixel liegen. Der gemittelte Wert aller neun Ausgangshöhen wurde schließlich dem neuen 90 m Pixel zugewiesen. Da die primäre Fehlerquelle der Höhendaten den Charakter eines „zufälligen Fehlers“ aufweist, wird durch die Mittelung der Werte dieser auftretende Fehler ungefähr um den Faktor drei verringert [NAS03].



Abbildung 4.2: Netzartige Abdeckung der SAR-X Daten [DLR07]

Während sich die amerikanische NIMA (National Imagery and Mapping Agency) und NASA (National Aeronautics and Space Administration) für die Kosten des Fluges und für die Entwicklung des SIR-C Sensors verantwortlich zeigten, wurde von deutscher und italienischer Seite das X-SAR System beigesteuert [DLR99] [NAS07].

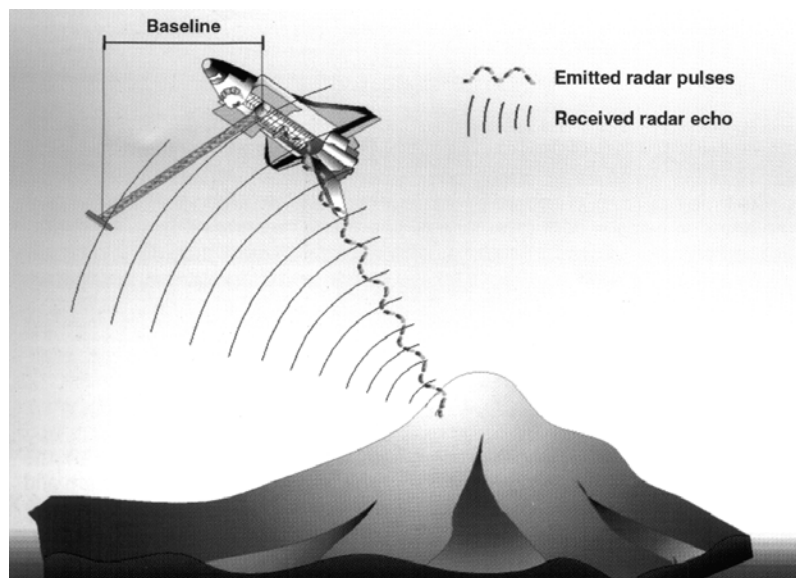


Abbildung 4.3: Darstellung des interferometrischen SRTM Radars [DLR99]

Das interferometrische SRTM Radar besteht aus zwei simultan arbeitenden Antennen. Für jeden Sensor gibt es eine Antenne, die das Signal aussenden und empfangen kann sowie eine

empfangende Antenne, die über eine Basislinie (Baseline) von 60m von der emittierenden Antenne getrennt ist (Abbildung 4.3) [DLR99].

Die Produktparameter für die X-SAR und SIR-C Höhenmodelle können Tabelle 4.1 entnommen werden. Die Datensätze liegen im gleichmäßigen Rasterformat (Grid) vor.

Tabelle 4.1: Eigenschaften des SRTM Höhenmodelle [DLR99][USG07]

| Produkt Parameter | SRTM- Geländemodellprodukte | | |
|---|---|--------------|--------------------------|
| | SRTM X-SAR | SRTM SIR-C | SRTM SIR-C |
| | DTED Level 2 | DTED Level 2 | DTED Level 1 |
| Geometrische Angaben | | | |
| Stützstellenabstand/ Räumliche Auflösung | 1x1 arcsec (~ 30x30m) | | 3x3 arcsec (~ 90x90m) |
| Horizontales Datum | Geographisches Koordinatensystem WGS 84 | | |
| Vertikales Datum | WGS 84 Ellipsoid | EGM96 Geoid | |
| Auflösung vertikal | Meter | | |
| Genauigkeitsangaben | | | |
| Horizontale Genauigkeit (90%) | | | |
| Absolut | < 20 Meter | | < 60 Meter |
| Relativ | < 15 Meter | | < 45 Meter |
| Vertikale Genauigkeit (90%) | | | |
| Absolut | < 16 Meter | < 16 Meter | < 16 Meter |
| Relativ | < 6 Meter | < 10 Meter | < 10 Meter |

Aufgrund der unterschiedlichen Wellenlängen der beiden Radarsensoren (X-Band 3,2 cm; C-Band 5,6 cm) weisen beide Höhenmodelle unterschiedliche Eigenschaften auf. Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, dringt die kurzwellige X-Band Strahlung nicht so stark in die aufgenommenen Oberflächen ein, wie es bei den langwelligeren C-Band Mikrowellen zu erwarten wäre. Somit kann davon ausgegangen werden, daß die mittels des SAR-X System aufgezeichneten Höhendaten einem DOM näher kommen, während sich die vom SIR-C Sensor vermessenen Datensätze hingegen einem DGM annähern müßten. Ob diese Vermutungen zutreffen, soll im Rahmen der vorliegenden Untersuchung genauer betrachtet werden.

4.3.2 Laser-Scanning Höhenmodelle

Neben Radarsensoren sind Verfahren des Laserscannings zur Genierung von digitalen Höhenmodellen weit verbreitet. Zwar sind dem System aufgrund des flugzeuggestützten Betriebes räumliche wie auch wirtschaftliche Grenzen gesetzt, doch ist diese Methode insbesondere für hochgenaue Vermessungen von großer Bedeutung.

Zu diesem Zweck wurden zwei digitale Geländemodelle, basierend auf Laser-Scanning Verfahren, von der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation, (HVBG) vormals Hessisches Landes Vermessungsamt (HLVA), zur Verfügung gestellt.

Der erste Datensatz wurde während einer LIDAR-Befliegung im Winter 2000 durch die Firma Eurosense gewonnen, so daß nur eine geringe Vegetations- und Laubbedeckung vorzufinden war. Zum Zeitpunkt der Datenübergabe (2004) durch die HVBG lagen die Höheninformationen nicht mehr im Ursprungsdatenformat der LIDAR-Befliegung vor. Sie waren bereits hinsichtlich einer Abbildung als Bodenpunkt bzw. Nicht-Bodenpunkt prozessiert. Der Algorithmus berücksichtigt hierbei nicht, ob es sich bei dem Punkt um eine erste oder letzte Reflektion handelt, sondern bewertet die logische Lage des Punktes [HVB05]. Der Reflektionsgrad des Lasers kann bei diesem Datensatz demnach nicht mehr nachvollzogen werden. Aus diesem Grund wurden ohne Berücksichtigung irgendwelcher

4. 3BKonzeption zur Qualitätssteigerung von Geländedaten

Randbedingungen alle zur Verfügung stehenden Höhenwerte zu einem Modell zusammengefügt.

Die Laserscanningdaten lagen mit einer horizontalen Referenz im Gauß-Krüger-Koordinatensystem vor. Die vertikale Referenz bezog sich auf das für Hessen angewendete Denker-Geoid [Den06], welches mit dem EGM96 Geoid nahezu identisch ist (Diff. < 10cm) [HVB06].

Die Übergabe der Geländedaten erfolgte im ASCII Format, bestehend aus tabellarisch abgelegten X-, Y- und Z-Koordinaten. Im Gegensatz zu den bereits in ein gleichmäßiges Raster überführten SRTM-Daten, liegen diese Höheninformationen als „Punktwolke“ vor.

Das zweite Höhenmodell wurde durch eine Befliegung der Firma Infoterra im Jahr 2004 gewonnen. Um auch hier den Einfluß der Vegetation so gering wie möglich zu halten, wurde auch diese Vermessung in den Wintermonaten durchgeführt.

Die Daten konnten im ursprünglichen LIDAR-Datenformat durch die HVBG 2006 an das Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik übergeben werden. Eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden Informationen des LIDAR Protokolls wird in Abbildung 4.4 dargestellt.

| GPS Time | UTM Zone | First Reflection UTM North | First Reflection UTM East | First Height | Last Reflection UTM North | Last Reflection UTM East | Last Height | Last Intensity |
|--------------|-------------|----------------------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|-------------|----------------|
| 45167.982260 | 32506621.70 | 5482050.74 | 567.23 | 32506621.70 | 5482050.75 | 567.29 | 86 | 86 |
| 45167.982300 | 32506621.72 | 5482053.00 | 570.23 | 32506621.72 | 5482053.01 | 570.29 | 120 | 120 |
| 45167.982340 | 32506621.80 | 5482054.38 | 567.25 | 32506621.80 | 5482054.39 | 567.35 | 113 | 113 |
| 45167.982380 | 32506621.86 | 5482056.24 | 566.30 | 32506621.86 | 5482056.24 | 566.34 | 75 | 75 |
| 45167.982420 | 32506621.90 | 5482057.85 | 566.38 | 32506621.90 | 5482057.86 | 566.46 | 104 | 104 |
| 45167.982460 | 32506621.96 | 5482059.84 | 566.12 | 32506621.96 | 5482059.85 | 566.18 | 42 | 42 |
| 45167.982500 | 32506622.00 | 5482061.73 | 566.95 | 32506622.00 | 5482061.74 | 567.00 | 56 | 56 |
| 45167.982540 | 32506622.07 | 5482063.27 | 564.87 | 32506622.07 | 5482063.27 | 564.91 | 138 | 138 |
| 45167.982580 | 32506622.32 | 5482061.82 | 540.18 | 32506622.16 | 5482064.41 | 559.80 | 24 | 24 |
| 45167.982620 | 32506622.38 | 5482063.61 | 539.67 | 32506622.19 | 5482066.46 | 561.52 | 10 | 10 |
| 45167.982660 | 32506622.21 | 5482068.84 | 565.95 | 32506622.20 | 5482068.86 | 566.07 | 94 | 94 |
| 45167.982700 | 32506622.27 | 5482070.68 | 564.75 | 32506622.27 | 5482070.68 | 564.76 | 120 | 120 |
| 45167.982740 | 32506622.30 | 5482072.66 | 566.42 | 32506622.30 | 5482072.66 | 566.42 | 35 | 35 |
| 45167.982780 | 32506622.44 | 5482073.24 | 556.27 | 32506622.37 | 5482074.24 | 564.55 | 10 | 10 |

Abbildung 4.4: LIDAR ASCII Protokoll

Die LIDAR Aufzeichnungen lagen in einer neunspaltigen, tabellarisch aufgebauten Klartextdatei, vor. Zuerst wird die GPS-Zeit des ausgesendeten Laserstrahles angegeben. In den nächsten drei Spalten sind die Lageinformation in Länge, Breite und Höhe für die erste Reflektion des Strahles angegeben. Diese Informationen geben den Ort wieder, an dem der Laserstrahl zum ersten Mal reflektiert wurde. Die nächsten drei Spalten zeigen die Lokalität, an welcher derselbe Strahl zum letzten Mal zurückgeworfen wurde. Die letzten beiden Spalten geben schließlich Aufschluß über die Intensität mit der der Rücklauf aufgezeichnet wurde. Diese Information wird wiederum in eine erste und letzte Reflektion unterteilt. Somit ist es möglich, in einem „Single Paß“, ohne aufwendige Prozessierung Informationen über Bodenpunkte (DGM) und Nichtbodenpunkte (DOM) anzubieten [Inf05]. Eine Übersicht über die Parameter der untersuchten LIDAR Höhenmodelle sind in Tabelle 4.2 wiedergegeben.

Aus den Punktwolken der beiden LIDAR-Vermessungen wurden schließlich Geländemodelle im gleichmäßigen Rasterformat erstellt, wobei bei der Berechnung der Datensätze darauf geachtet wurde, daß ein möglichst lückenloses Gitter an Höheninformationen bereitgestellt werden konnte. Dies hat zur Folge, daß für die LIDAR-Befliegung aus dem Jahr 2000 ein Stützstellenabstand von 10 m gewählt wurde. Aus den Laserdaten der Infoterra Befliegung 2004 konnten Rasterdaten mit einer Pixelgröße von 5 m abgeleitet werden.

Genauere Angaben zur Genauigkeit der Höhendaten wurden durch das HVBG nicht gegeben. Da die Höhengengenauigkeit von LIDAR Geländemodellen von dem verwendeten Sensor und der Flughöhe abhängt und diese Parameter nicht bekannt sind, läßt sich so auch keine genaue Aussage über die Qualität ableiten. Demnach wird vorerst von den üblichen Genauigkeitsangaben des Höhenfehlers von LIDAR Systemen für Vermessungen in der Ebene ausgegangen, die zwischen 5 und 35 cm liegen [Inf05] [Swi07].

Tabelle 4.2: Eigenschaften der LIDAR Höhenmodelle

| Produkt Parameter | LIDAR- Geländemodelle | |
|---|---|--|
| | Eurosense LIDAR Modell 2000 | Infoterra LIDAR Modell 2004 |
| Geometrische Angaben | | |
| Stützstellenabstand/ Räumliche Auflösung | 3D-Punktwolke / 10m | 3D-Punktwolke / 5m |
| Horizontales Datum | Projiziertes Koordinatensystem Gauß-Krüger | Projiziertes Koordinatensystem UTM - WGS 84 |
| Vertikales Datum | Denker Geoid | WGS 84 Ellipsoid |
| Auflösung vertikal / horizontal | cm | |

4.3.3 Photogrammetrisches Referenzhöhenmodell

Mittels Verfahren der Stereo-Photogrammetrie lassen sich Höhendaten mit beinahe beliebiger Auflösung und sehr hoher Qualität gewinnen. Aufgrund der hohen Arbeitsintensität ist diese Methode allerdings nur geeignet, Daten für begrenzte Gebiete zu erheben. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein DOM des Bereiches Michelstadt/Odenwald (Hessen) mit einem Stützstellenabstand von 2 m und einer Fläche von ca. 50 km² erstellt. Dieses Höhenmodell wurde am Fachgebiet Flugsysteme und Regelungstechnik (FSR) im Rahmen einer Diplomarbeit erzeugt [Pau05]. Basis für die Generierung waren vom HVBG bereits digitalisierte Luftbilder mit einer Bodenauflösung von 33 cm. Die äußere Orientierung der Luftbilder erfolgte mit Hilfe von Paßpunkten, die mit einem Differential GPS (D-GPS) des Typs LEICA 500 vor Ort eingemessen wurden. Somit konnte gewährleistet werden, daß die Verbindung der Bildkoordinaten in das geographische Koordinatensystem WGS84 als horizontale Referenz exakt erfolgte. Das vertikale Bezugssystem der nun geo-referenzierten Luftbilder ist das in der GPS-Vermessung übliche WGS 84 Ellipsoid [Leic99].

Die Auflösung des automatisch generierten Ausgangsmodells betrug 1 m, wurde aber aufgrund der hohen Datenmenge über den Mittelwertansatz auf ein 2 m Gelände reduziert. Die automatische Generierung des Höhenmodells erfolgte unter Verwendung der Software Socet Set 4.3.1 der Firma BAE-Systems.

Da dieses photogrammetrisch erstellte Höhenmodell an der TU-Darmstadt erstellt wurde, liegen zu dem Datensatz keine Angaben über die Qualitätsparameter vor. Diese werden jedoch im Rahmen dieser Arbeit ermittelt (siehe Abschnitt 5.1.2.1).

4.3.4 DGM5 Höhenmodelle

Als weitere Referenzdatensätze zur Verifizierung der mittels Fernerkundung erstellten Höhendaten (Radar und Laser) kommen neben dem aus Stereo-Photogrammetrie gewonnenen DOM auch DGM Geländedaten zum Einsatz. Diese Geländemodelle des Typs DGM5 sind Produkte der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG) sowie der Bayerischen Vermessungsverwaltung (BVV) und wurden durch die Ämter für Forschungszwecke kostenlos an das FSR übergeben. Die Eigenschaften und Produktparameter können Tabelle 4.3 entnommen werden [HVB07] [BVV07].

Da insbesondere für das DGM5 des BVV keine genauen Angaben hinsichtlich der Qualität zur Verfügung stehen, läßt sich keine abschließende Bewertung vornehmen. Zur genauen Qualitätsanalyse ist eine zusätzliche Verifizierung über Paßpunkte notwendig.

Tabelle 4.3: Eigenschaften der DGM5 Höhenmodelle

| Produkt Parameter | DGM5- Geländemodelle | |
|---|---|---|
| | DGM5 Höhenmodell HVBG | DGM5 Höhenmodell BVV |
| Geometrische Angaben | | |
| Stützstellenabstand/ Räumliche Auflösung | 10 m | |
| Horizontales Datum | Gauß-Krüger Koordinatensystem Bessel Ellipsoid | |
| Vertikales Datum | Denker Geoid | Lelgemann Geoid |
| Auflösung horizontal | cm | m |
| Auflösung vertikal | mm | cm |
| Genauigkeitsangaben | | |
| Höhengenaugkeit | <1m | nicht genau angegeben (bis zu 0,5 m) |
| Herstellungsweise | photogrammetrische Messungen und Laserscanning | Digitalisierung der Höhenflurkarte |

4.4 Untersuchungsgebiete

Um einen aussagekräftigen Vergleich verschiedener Geländemodelle vornehmen zu können, müssen Untersuchungsgebiete ausgewählt werden, für die Geländedaten der zu untersuchenden Sensoren vorhanden sind bzw. die topographische Gegenebenheiten aufweisen, die analyserelevant sind. Die unter diesen Aspekten ausgewählten Untersuchungsgebiete liegen in einem Bereich um Michelstadt im Odenwald sowie bei Pfronten im Ostallgäu.

Bei der Auswahl der Untersuchungsgebiete wurde Wert darauf gelegt, daß sämtliche relevanten Geländebedeckungs- sowie Geländeoberflächenformen repräsentiert sind. Ebenfalls wurde darauf geachtet, daß sich keine größeren Gewässer in den untersuchten Bereichen befinden. Eine detaillierte Beschreibung der ausgewählten Untersuchungsgebiete wird im Folgenden vorgenommen.

4.4.1 Bereich Michelstadt/Odenwald

Das Untersuchungsgebiet im Bereich Michelstadt/Odenwald (Hessen) stellt eine typische Mittelgebirgslandschaft dar und hat eine Größe von ca. 50 km² (4,1 km x 12,3 km). Michelstadt ist die größte Stadt des Odenwaldkreises. Dieser wiederum umfaßt den mittleren Teil des Odenwaldes.

Die Stadt Michelstadt liegt in einem zum großen Teil landwirtschaftlich genutzten Tal, durch das der Fluß Mümmling fließt. Das Untersuchungsgebiet stellt einen von Ost nach West verlaufendem Geländeausschnitt dar (Abbildung 4.5). Zu beiden Seiten des Tals erheben sich Anhöhen. Der maximale Höhenunterschied im Untersuchungsgebiet beträgt etwa 400 Meter, wobei der tiefste Punkt im Tal bei Michelstadt (213 m) liegt. Der höchste Punkt liegt östlich von Michelstadt auf einem kleinen Höhenzug (617 m), kurz vor der Ortschaft Würzburg.

Das Untersuchungsgebiet ist überwiegend bewaldet, wobei Mischwald vorherrscht. Die landwirtschaftliche Nutzung ist hauptsächlich durch Ackerland geprägt. Außer dem Fluß Mümmling und einem kleinen Weiher in der nord-westlichsten Ecke kommen keine größeren Wasserflächen vor.

Aufgrund seiner abwechslungsreichen Topographie und Vegetation eignet sich dieser Abschnitt eines Mittelgebirges hervorragend, um den Einfluß der Oberflächenstruktur auf die Genauigkeit der mittels Fernerkundung generierten Höhenmodelle zu untersuchen. Alle charakteristischen Topographien wie Hügel und Täler, urbane Gebiete, Wiesen- und Ackerslandschaften sowie alle Arten von Bewaldung werden vorgefunden.



Abbildung 4.5: Überblick über das zentrale Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald

Zusätzlich zu dem in Abbildung 4.5 dargestellten zentralen Untersuchungsgebiet für das ein DOM als Referenzdatensatz zur Verfügung steht, wurden zwei zusätzliche Untersuchungsgebiete im Bereich Michelstadt ausgewählt. Für diese steht als Referenzdatensatz lediglich ein DGM5 Höhenmodell zur Verfügung. Diese beiden Untersuchungsgebiete liegen nördlich bzw. südlich des zentralen Bereiches und weisen jeweils eine Größe von ca. 150 km² auf. Mit Hilfe dieser Gebiete sollen die im Jahr 2004 gewonnenen LIDAR Höhenmodelle verifiziert und auf ihre Eigenschaften hin untersucht werden.

Aufgrund der geringen Geländeneigungen und Steigungswechsel in dem Bereich um Michelstadt ist es notwendig, neben diesem Untersuchungsgebiet ein weiteres zu bestimmen, welches durch einen alpinen Charakter geprägt ist, um schließlich eindeutig den Einfluß der Hangneigung auf die Vermessungsprozesse festzustellen zu können.

4.4.2 Bereich Pfronten/Ostallgäu

Das Untersuchungsgebiet bei Pfronten im Ostallgäu hat eine Größe von ca. 30 km² (5,3 km x 5,5 km). Die Topographie der Region Pfronten ist charakteristisch für den südlichen (alpinen) Teil des Allgäus. Von besonderem Interesse in diesem Untersuchungsgebiet sind der Breitenberg (1838 m), der Aggenstein (1985 m), der Kienberg (1534 m) und ein Teil der Weißenseer Berge mit der Burgruine Falkenstein (1277 m) (siehe Abbildung 4.6).

Die Vegetation im Untersuchungsgebiet ist überwiegend durch Grasland und Nadelgehölz geprägt. In den Tallagen überwiegt Weideland mit vereinzelt kleinräumigen Nadelgehölzen. Die mäßig steilen Berghänge bis zur Baumgrenze (ca. 1600 – 1800 m) sind vorwiegend mit Tannen, in den oberen Regionen mit Bergkiefern (Latschen) bewachsen. Die Bedeckung wird mit zunehmender Höhe lichter. Steile Berghänge sind überwiegend vegetationsfrei. Die Regionen oberhalb der Baumgrenze weisen Matten, einen hochalpinen Magerrasen sowie nackten Fels auf.

Im Gegensatz zum Untersuchungsgebiet bei Michelstadt zeigt das Untersuchungsgebiet bei Pfronten eine weniger heterogene Bedeckung. Die Vegetation wie auch die gesamte Topographie des Untersuchungsgebietes ist durch ihren alpinen Charakter geprägt.

Einziges nennenswertes Gewässer im Untersuchungsgebiet ist der Fluß Vils, welcher von West nach Ost nördlich des Breitenberges entlang fließt.

Das Gebiet des südlichen Allgäus eignet sich aufgrund seines alpinen Charakters und den damit einhergehenden starken Geländeneigungen und Steigungswechseln zur Untersuchung des Einflusses, den entsprechende topographische Gegebenheiten auf den Vermessungsprozeß von aktiv arbeitenden Sensoren haben.

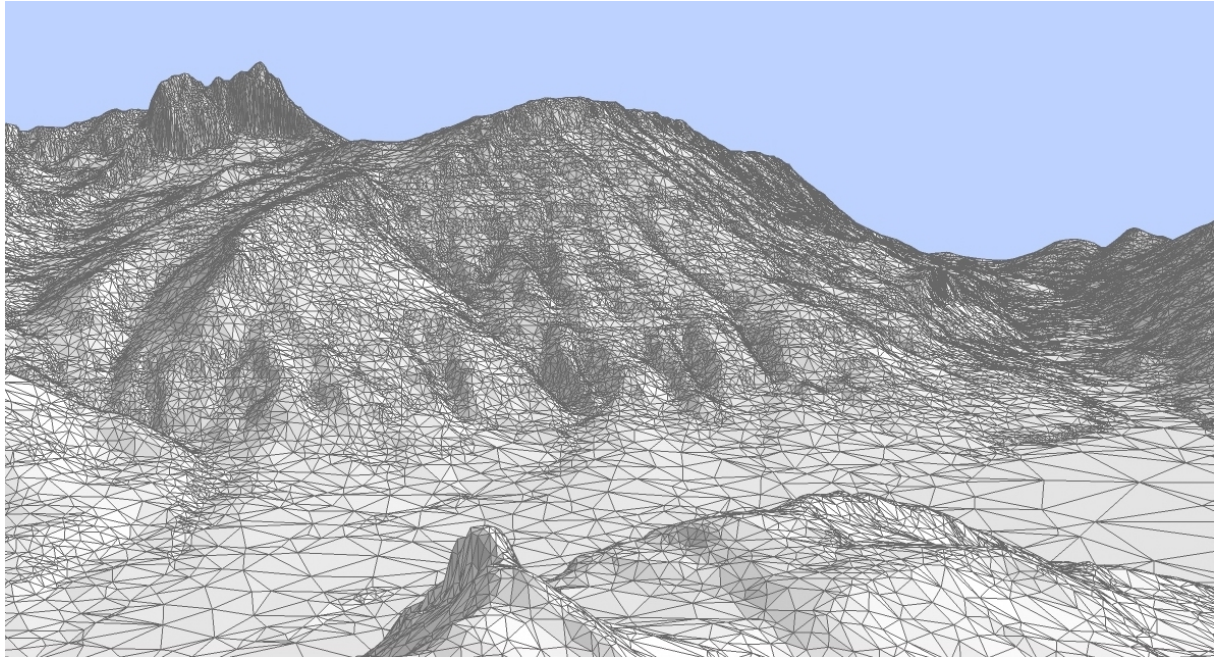


Abbildung 4.6: DGM Untersuchungsgebiet Pfronten mit Breitenberg und Aggenstein

4.5 Methoden zur Bewertung von Geländemodellen

Um die Eignung eines Geländemodells hinsichtlich eines bestimmten Anwendungsgebietes bestimmen zu können, bedarf es einer passenden Analysemethodik. Da für die in Abschnitt 3 beschriebenen Luftfahrtanwendungen ein Oberflächengeländemodell favorisiert werden sollte, muß eine Verifizierung der untersuchten Datensätze gegen eine geeignete Referenz erfolgen. Als Referenzdaten sollen Referenzpunkte (Punktanalyse) wie auch ganze Geländemodelle (Flächenanalyse) herangezogen werden. Letztlich soll am Ende des Verifizierungsprozesses durch die Bestimmung verschiedener Qualitätsparameter eine Aussage getroffen werden, ob die Anforderungen der in Abschnitt 3.1 vorgestellten internationalen Standards erfüllt werden können oder ob ein Verfahren zur Steigerung der Genauigkeit eingeleitet werden muß.

4.5.1 Verifizierung mit Hilfe von Kontrollpunkten

Bei der Gelände-verifizierung mit Hilfe von Kontrollpunkten werden Referenzpunkte auf das zu untersuchende Höhenmodell projiziert und die Differenz der entsprechenden Pixelwerte der Rasterdaten und der Kontrollpunkte bestimmt (Abbildung 4.7). Negativ dargestellte Werte weisen Punkte auf, bei denen das Geländemodell höher liegt als die Referenz.

Die Referenzpunkte können aus einer Vielzahl von Quellen stammen. Während [YKB06] zur Validierung Punkte aus GPS-Vermessungen heranzieht, werden bei [KHL02] Lage und Höheninformationen Trigonometrischer Punkte (TP) ausgewertet. [HK06] hingegen extrahierten Kontrollpunkte aus einem mit Differential GPS (DGPS) vermessenen Paßpunkten geo-referenzierten Luftbildblock. Diese Methode bietet den Vorteil, daß nicht nur Bodenpunkte als Referenz zur Verfügung stehen. Neben den genannten Datenquellen können noch weitere Arten von Kontrollpunkten verwendet werden, sofern die entsprechende Lage- und Höhengenaugigkeiten gewährleistet sind.

Mit den errechneten Differenzen lassen sich schließlich entsprechende Qualitätsparameter bestimmen und somit eine Bewertung des untersuchten Geländemodells durchführen.

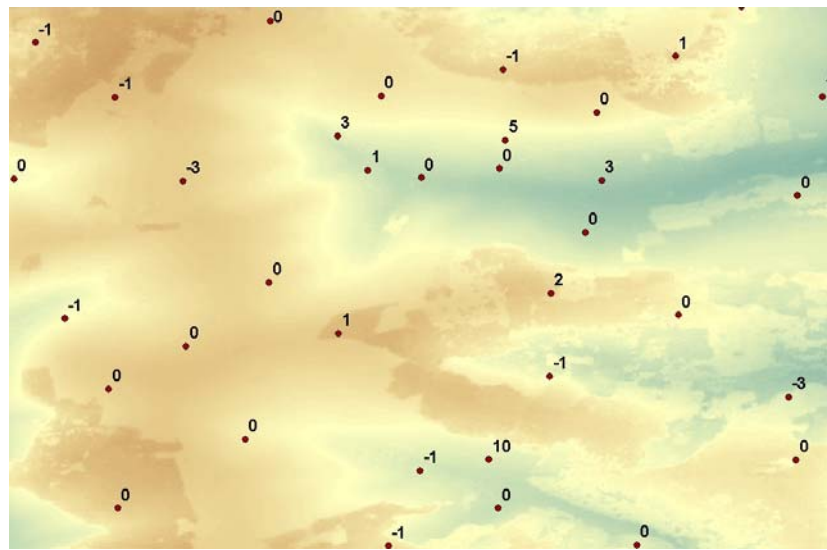


Abbildung 4.7: Geländedatenverifizierung mit Hilfe von Kontrollpunkten

4.5.2 Verifizierung mit Hilfe von Referenzgeländemodellen

Bei der Verifizierung auf der Basis von Referenzgeländemodellen werden im Gegensatz zur Punktanalyse nicht nur einzelne Punkte auf ihre Genauigkeit hin überprüft, sondern komplette Datensätze. Das heißt, das zu untersuchende Höhenmodell wird von einem Referenzmodell subtrahiert und das entstandene Differenzmodell betrachtet. Vorteilhaft ist bei diesem Vorgehen, daß, wie bei einer Verifizierung mit Hilfe von Kontrollpunkten, nicht nur Stichproben untersucht werden, sondern eine flächendeckende Analyse durchgeführt werden kann. Um allerdings ein Referenzmodell bestimmen zu können, welches ein notwendiges Höchstmaß an Genauigkeit aufweist, muß wiederum ein Verifikationsprozeß durchlaufen werden. Dieser kann jedoch meist nur durch einen Vergleich mit Kontrollpunkten erfolgen.

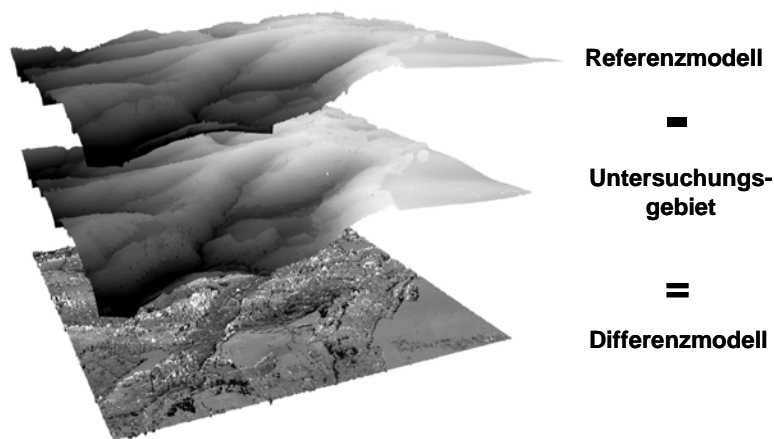


Abbildung 4.8: Geländedatenverifizierung mit Hilfe von Referenzmodellen

Abbildung 4.8 zeigt exemplarisch das Vorgehen eines Geländevergleiches wie es mit der in der GIS-Software ArcInfo implementierten „Grid/Subtract“ Funktion erfolgt. Hier wird ein zweites Geländemodell (Untersuchungsgebiet) von einem ersten (Referenzgebiet) abgezogen. Die Berechnung der Differenz basiert auf einer „Zelle für Zelle“-Analyse. Die Berechnung kann sowohl für *Integer* wie auch *Float* Rasterdaten durchgeführt werden [Esr05]. Sollte die Pixelgröße der beiden Rasterdatensätze differieren, werden die Pixelwerte der von der

größeren Zelle überdeckten Bildpunkte gemittelt und schließlich vom Wert des größeren Rasters abgezogen. Das ermittelte Differenzmodell weist schließlich die Maschenweite des größeren Eingangsdatensatzes auf. Wie bei der Kontrollpunktanalyse können auf der Basis der ermittelten Höhendifferenzen die Qualitätsparameter bestimmt werden, die schließlich eine Bewertung des Datensatzes zulassen.

Soll dieses Differenzmodell zusätzlich zu einer globalen Fehleranalyse noch hinsichtlich einzelner Einflußfaktoren untersucht werden, kann dieses in beliebige Kategorien zerlegt werden. Abbildung 4.9 zeigt beispielsweise die Extraktion von urbanen Gebieten aus einem Differenzmodell.

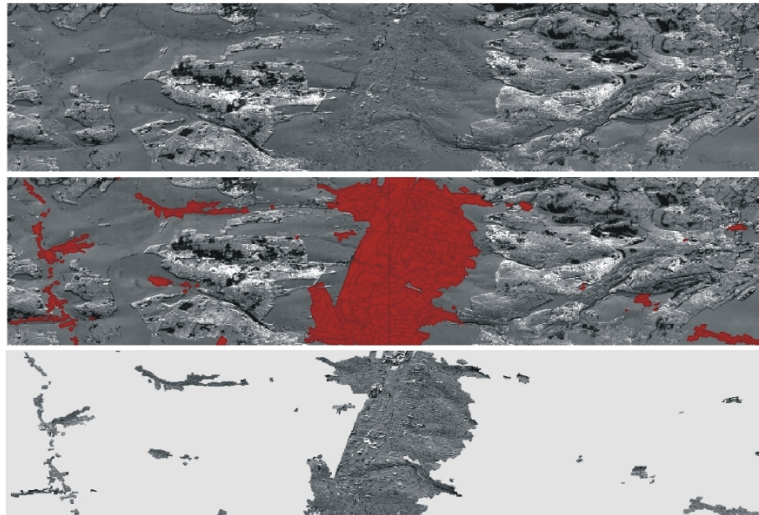


Abbildung 4.9: Zerlegung eines Differenzmodells

4.6 Einfluß der Oberflächeneigenschaften

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, haben die Oberflächeneigenschaften eines Geländeabschnitts einen beachtlichen Einfluß auf den Generierungsprozeß von aktiven Sensoren zur Geländevermessung. Einhergehend mit der Störung der Signale wird auch die Qualität des erzeugten Datensatzes zum Teil erheblich beeinflusst. Als primäre Einflußquellen wurde die Geländerauhigkeit, die Oberflächenstruktur wie auch die Reflektionskapazität identifiziert. Um die Einflußnahme durch diese Faktoren quantifizieren zu können, sollen in der vorliegenden Untersuchung die einzelnen Störgrößen genau analysiert werden.

4.6.1 Geländerauhigkeit

Starke Geländesteigungen wie auch häufige Neigungswechsel wirken sich nachteilig auf den Generierungsprozeß von fernerkundlich arbeitenden aktiven Sensoren und somit auf die Qualität von digitalen Höheninformationen aus (vgl. z.B. Abschnitt 2.2.2). Um den Einfluß dieses Faktors genau quantifizieren zu können, soll untersucht werden, wie ein Genauigkeitsverlust eines Geländemodells in direktem Zusammenhang mit einer Zunahme der Geländesteigung bzw. der Rauigkeit des aufgenommen Gebietes steht.

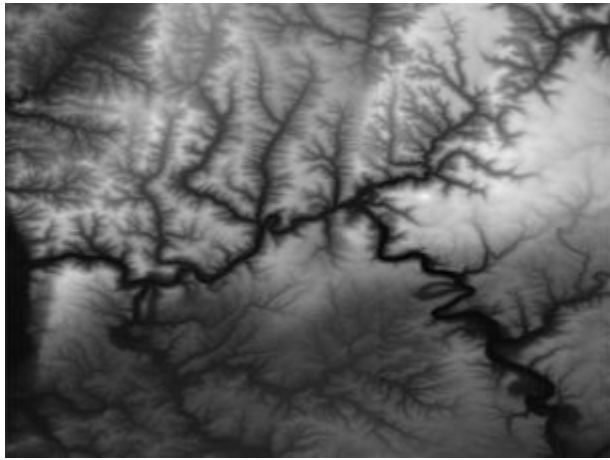
Hierzu soll für die Höheninformationen der Untersuchungsgebiete eine Kategorisierung nach Steigungsklassen vorgenommen werden. Um die Informationen über die Steigungen bereitzustellen zu können, sollen diese aus Geländemodellen berechnet werden.

Als Basis für die Berechnung der Geländesteigungen sollen Geländemodelle herangezogen werden, die zum einen auf der Basis von terrestrischen Vermessungsmethoden gewonnen wurden bzw. ein DGM wiedergeben. Dies hat zum einen den Vorteil, daß die Datensätze keine Steigungsschwankungen beinhalten, die auf Vegetationswechsel beruhen können. Zum anderen kann somit ausgeschlossen werden, daß die Fehler, die unter der Verwendung von

Methoden der Fernerkundung auftreten auch in den Datensätzen vorzufinden sind, die zur Berechnung der Steigungsklassen verwendet werden. Ebenfalls vorteilhaft erweist sich bei einer Steigungsklassifizierung eine hohe räumliche Auflösung der Basisdaten.

Als geeignete Datengrundlage für eine Kategorisierung der Geländeneigung kann das bereits in Abschnitt 4.3.4 beschriebene DGM5 Höhenmodell der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG) sowie der Bayerischen Vermessungsverwaltung (BVV) verwendet werden.

Aus den genannten Rasterdaten mit einem Stützstellenabstand von 10 m wird mit Hilfe der im GIS-Software Paket ArcInfo implementierten Funktion *slope*, der Grad der maximalen Änderung der Höhenwerte zwischen jeder Zelle berechnet. Der errechnete Datensatz mit den Steigungsinformationen liegt im Rasterformat mit demselben Stützstellenabstand wie der Ausgangsdatsatz vor. Die Neigungswerte können wahlweise in Grad oder Prozent ausgegeben werden [Esr05]. Abbildung 4.10 zeigt einen Beispieldatsatz mit Steigungsinformationen eines Geländeabschnittes.



a) Geländemodell



b) Steigungskarte

Abbildung 4.10: Beispiel eines Rasterdatensatzes sowie der dazugehörigen Steigungskarte

4.6.2 Oberflächenbedeckung

Die Bedeckung der Erdoberfläche hat wie in Abschnitt 2.1 gezeigt wurde, eine beachtliche Auswirkung auf die Qualität eines Höhenmodells. Aus diesem Grund gilt es im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu ermitteln, wie sich die verschiedenen Arten der Bodenbedeckung auswirken. Deshalb soll eine Analyse der Einflußfaktoren erfolgen, die eine Quantifizierung dieser Fehler zuläßt.

Zunächst muß eine entsprechende Klassifizierung des Untersuchungsgebietes durchgeführt werden, die sowohl alle interessanten Bedeckungsarten beinhaltet, aber auch eine räumliche Auflösung und Genauigkeit besitzt, die eine Untersuchung von Geländemodellen mit Stützstellenabständen von 5 Metern und kleiner erlaubt.

In einem ersten Schritt sollen schließlich jene Bedeckungsklassen definiert werden, die mutmaßlich einen deutlichen Einfluß auf das Reflektionsverhalten der Strahlung des Vermessungssensors haben.

Bei einer genaueren Betrachtung des Untersuchungsgebietes konnten folgende Klassen als maßgeblich identifiziert werden:

- 1.) **Bebaute Flächen:** Aufgrund der sehr inhomogenen Struktur von bebauten Flächen ist mit einer Vielzahl von Störungsfaktoren zu rechnen. Diese gehen über eine hohe Rauigkeit mit häufigen Neigungswechseln, bis hin zu einer Spiegelung der

Strahlung. Auch die Eindringtiefen variieren aufgrund unterschiedlicher Bedeckungsdichten. Alle diese Faktoren sind auf einer sehr begrenzten Fläche vorzufinden. Somit ist eine weitergehende Unterteilung nicht immer möglich. Die auftretenden Fehler werden demnach für diese Bereiche pauschal bestimmt.

- 2.) **Waldgebiete:** Weite Flächen des Untersuchungsgebietes bei Michelstadt sind mit Wald bedeckt. Die vorgefundenen bewaldeten Flächen geben alle drei in Mitteleuropa vorkommenden Waldtypen wieder: Laubwald, Nadelwald und Mischwald. Eine exakte Unterteilung der Bewaldung in diese drei Arten erscheint zwingend notwendig, da abhängig von der Jahreszeit die Dichte der Oberfläche sehr stark variieren kann. Wie in 2.1 beschrieben, bedient sich die klassische Geodäsie meist eines DGM. Aus diesem Grund erfolgen die meisten Vermessungskampagnen in den laubfreien und vegetationsarmen Wintermonaten, um den Einfluß der Vegetation zu minimieren. Beruhend auf dieser Tatsache ist es notwendig, eine weitgehende Unterteilung der Waldgebiete vorzunehmen.
- 3.) **Grünland:** In dieser Kategorie sollen alle Flächen betrachtet werden, die sich durch immergrüne Pflanzen (Wiesen) auszeichnen. Der Vegetationsstand ist über das ganze Jahr weitgehend identisch.
- 4.) **Ackerland:** Diese Klasse gibt jene Gebiete wieder, die einer landwirtschaftlichen Nutzung unterliegen. Weideflächen sollen in dieser Kategorie nicht abgebildet werden, da diese bereits in der Klasse Grünland berücksichtigt sind.
- 5.) **Gewässer:** Wasserflächen bewirken aufgrund ihrer glatten Oberfläche, daß die von Vermessungssensoren ausgesendete Strahlung meist gespiegelt wird. Dies hat zur Folge, daß keine Informationen an den Systemträger zurückgesandt werden. Diese Tatsache bewirkt, daß solche Flächen meist als „Voids“ (Datenlücken) in den Datensätzen vorzufinden sind. Um diese Flächen in einem Datensatz eindeutig identifizieren zu können, muß eine Klassifizierung dieser Flächen erfolgen.
- 6.) **Sonstige Freiflächen:** Ebenfalls von Interesse bei einer Oberflächenklassifizierung sind Gebiete, die anthropogen geprägte Flächen darstellen. Diese können zum einen Verkehrsflächen, aber auch Steinbrüche oder Halden sein. Auch diese können, sofern sie eine entsprechende räumliche Ausdehnung besitzen, die Richtigkeit von digitalen Höheninformationen beeinflussen.

Basierend auf dieser Auswahl an Oberflächenklassen muß schließlich eine Methode bzw. Datenbasis bestimmt werden, die es erlaubt, das Untersuchungsgebiet zu kategorisieren.

Abbildung 4.11 zeigt die Identifizierbarkeit der Oberflächenbedeckung anhand von Luftbildern, Objektkartierung und dem Geländemodell selbst.



Abbildung 4.11: Klassifizierung der Oberflächenbedeckung eines Geländemodells

Auf eine manuelle Extraktion der einzelnen Klassen aus einem Luftbild soll im Rahmen dieser Untersuchung verzichtet werden. Auch wenn durch das manuelle Extrahieren der Klassen eine sehr gute Lagegenauigkeit erreicht werden kann, ist eine Differenzierung zwischen den einzelnen Klassen nicht immer einfach. Ebenfalls gestaltet sich diese Methode

als sehr arbeitsaufwendig, wenn die angestrebte Genauigkeit realisiert werden soll. Aus diesem Grund wurde auf ein Datenprodukt zurückgegriffen, welches sowohl die Anforderungen an die Lagegenauigkeit wie auch Differenzierbarkeit der benötigten Klassen erfüllt. Zur Klassifizierung der Oberflächenstruktur wird somit das ATKIS DLM herangezogen. ATKIS ist der Markenname für das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem der Landesvermessungsämter. Die ATKIS-Daten sind geo-topographische Informationen in digitaler Form. Dieser bundeseinheitliche Datenbestand eignet sich für Verknüpfungen mit unterschiedlichsten Fachdaten. Er wird interessenneutral geführt und erfüllt sehr flexibel verschiedene Nutzerwünsche. Ein Teil dieser Produktlinien stellt das DLM – Digitales Landschaftsmodell dar. Das ATKIS DLM beinhaltet die wesentlichen Landschaftsobjekte nach Lage, Form, Namen und Eigenschaften in Form von Attributen. Es beschreibt so die Landschaft durch computerlesbare topographische Daten im Vektorformat. Die Daten sind nach bundeseinheitlichen Vorgaben erfaßt und garantieren eine sehr hohe Informationsdichte und Genauigkeit. Das Digitale Landschaftsmodell stellt Informationen zu folgenden Themengebieten bereit [HVB07]:

- **Siedlung:** Siedlungsflächen, baulich geprägte Flächen, Bauwerke und sonstige Einrichtungen
- **Verkehr:** Straßenverkehr, Schienenverkehr, Flugverkehr, Schiffsverkehr, Anlagen und Bauwerke für Verkehr und Transport
- **Vegetation:** Vegetationsflächen, Bäume und Büsche
- **Gewässer:** Wasserflächen, besondere Objekte in Gewässern, Einrichtungen und Bauwerke an Gewässern
- **Relief:** Besondere Geländeformen
- **Gebiete:** Verwaltungsgebiete, geo-topographische Gebietseinheiten, Schutzgebiete, Gefahrenggebiete, sonstige Sperrgebiete

Detaillierte Informationen über die abgebildeten Objekte sowie die Datenstruktur sind dem ATKIS-Objektartenkatalog zu entnehmen.

Die Daten liegen im Gauß-Krüger-Koordinatensystem, bezogen auf das Potsdam Datum (Zentralpunkt Rauenberg), vor. Die wesentlichen linearen Objekte wie Straßen oder Schienenbahnen weisen eine Lagegenauigkeit von ± 3 m auf. Die Aktualisierungszyklen der Elemente variieren zwischen einem Vierteljahr (z.B. Autobahnen, Bundes-, Landes- und Kreisstraßen) und 5 Jahren (z.B. Vegetation). [HVB07]

Aufgrund der Informationsdichte wie auch der Lagegenauigkeit und der Aktualisierungszyklen ist das digitale Landschaftsmodell der Produktlinie ATKIS eine geeignete Datengrundlage, um eine Klassifizierung der Oberflächenbedeckung vorzunehmen.

Schließlich wurden von der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG) ca. 1500 km² ATKIS DLM Daten im Bereich Südhessen – Odenwald zu Forschungszwecken kostenlos zur Verfügung gestellt.

4.6.3 Reflektionsintensität

Wie bei der Vermessung mittels Radarsystemen (Abschnitt 2.2.2) und Lasersystemen (Abschnitt 2.2.3) beschrieben, kehrt in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit des aufgezeichneten Gebietes nur ein Teil der ausgesandten Strahlung zum Empfänger des Sensors zurück. Zu jedem Höhenwert wird die entsprechende Information über die Intensität des Signals aufgezeichnet. Nun soll in der vorliegenden Arbeit nachgeprüft werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Stärke des rücklaufenden Signals und der Genauigkeit des gemessenen Höhenwertes besteht. Sollte ein Zusammenhang nachgewiesen werden können,

hätte dies einen erheblichen Vorteil bei der Anpassung des Datenmaterials. Es müßte nicht mehr auf zusätzliche Informationen wie die Oberflächenbedeckung bzw. -rauigkeit zurückgegriffen werden, da die notwendige Information zusammen mit den Höheninformationen erhoben werden. Sollte keine direkte Verbindung zwischen der Intensität und dem Höhenfehler nachgewiesen werden können, bestünde noch weiterhin die Möglichkeit, aus den Reflektionsintensitäten auf die Oberflächenbedeckung zu schließen, um auf diese Weise eine Kategorisierung der Oberflächeneigenschaften vorzunehmen.

Abbildung 4.12 zeigt einen Vergleich zwischen einem Luft- und einem LIDAR Intensitätenbild. Es zeigt sich, daß einzelne Elemente aus einem Intensitätenbild sicher identifiziert werden können. Allerdings ist es fraglich, ob diese Tatsache ausreichend ist, um eine Fehlergröße abzuleiten.

Um diese Untersuchungen vornehmen zu können, sollen jeweils die zu einem Höhendatensatz dazugehörigen Intensitätswerte sowohl für radar- und laserbasierende Geländeinformationen analysiert werden.



Abbildung 4.12: Vergleich Luftbild - Intensitätenbild

Für die Laserdaten werden die durch die Firma Infoterra für das HVBG in 2004 aufgenommen LIDAR-Datensätze (siehe Abschnitt 4.3.2) untersucht. Hier liegen Höhenwerte und Rücklaufintensitäten sowohl für die erste als auch die letzte Reflektion vor. Die Pixelgröße (Stützstellenabstand) wie auch die Lagegenauigkeit zwischen Höhen- und Reflektionswerten ist identisch, da beide Datensätzen aus dem LIDAR-Protokoll berechnet wurden.

Tabelle 4.4: Spezifikation des SRTM X-SAR GTC Radar Image [DLR07]

| Produktparameter | SRTM X-SAR Geocoded Terrain Corrected (GTC) Radar Image |
|-------------------------|--|
| Projektion | UTM |
| Ellipsoid | WGS84 |
| Bilddatenformat | Amplitude |
| Räumliche Auflösung | 25 m |
| Stützstellenabstand | 25 m |
| Abs. Lagefehler | < 30 m |

Ob ein Zusammenhang der Intensität des Radarechos und der Genauigkeit des Geländemodells bei Radarsystemen festgestellt werden kann, soll in dieser Arbeit anhand der durch die DLR gewonnenen SRTM X-Band-Daten überprüft werden. Neben den bereits beschriebenen Höheninformationen mit einem Stützstellenabstand von 30 m soll als Informationsquelle für die Intensitätsstärken des Radarsignals das von der DLR angebotene

Geocoded Terrain Corrected (GTC) Bildprodukt herangezogen werden. Bei dem GTC handelt es sich um ein ortho-entzerrtes und in eine Kartenprojektion transformiertes Radarbild. Die Bildparameter des GTC sind Tabelle 4.4 zu entnehmen.

In dem Verifikationsprozeß werden die Datensätze, welche die Informationen über die Intensität der Reflektionen bzw. Echos beinhalten, schließlich so kategorisiert, daß eine Analyse der Datenqualität unter Berücksichtigung der Rücklaufstärke des ausgesendeten Signals möglich ist. Wie bereits für die Analysen des Einflusses der Oberflächenrauigkeit sowie der topographischen Gegebenheiten beschrieben, werden die Lageinformationen der definierten Klassen dazu verwendet, die entsprechenden Gebiete aus dem Differenzmodell herauszutrennen, um diese separat analysieren zu können. Sollte ein systematischer Zusammenhang zwischen Reflektionsintensität und Fehlergröße nachweisbar sein, soll weiterhin untersucht werden, inwieweit eine Manipulation der Datensätze erfolgen kann, daß diese für sicherheitskritische Anwendungen in der Luftfahrt Verwendung finden können.

5 Realisierung

Im Folgenden soll anhand des in Abschnitt 4 beschriebenen Verfahrens eine Qualitätsanalyse sowie eine Anpassung der ausgewählten Geländedatensätze an die von der RTCA [RTC05a] und ICAO [ICA04] geforderten Genauigkeiten für die Area 2 vollzogen werden. Dieser Arbeitsvorgang wird in drei Phasen unterteilt:

- **Phase 1:** In der ersten Phase wird das betrachtete Datenmaterial in ein Format überführt, das eine Vergleichbarkeit der Informationen zuläßt. Daneben werden die Referenzdaten so vorbereitet, daß sie den notwendigen Informationsgehalt für die anstehenden Analysen bereitstellen, aber dennoch so einfach und übersichtlich wie möglich sind. Ebenfalls wird überprüft, ob die Referenzdatensätze den Ansprüchen einer Verifikationsgrundlage genügen.
- **Phase 2:** Im Anschluß werden die für den Einsatz in der Luftfahrt identifizierten Datensätze hinsichtlich ihres Fehlers unter verschiedenen Randbedingungen untersucht und die Abweichungen zur Referenz quantifiziert. Die betrachteten Einflußfaktoren sind die Oberflächenbedeckung, die Geländesteigung sowie die Reflektionsintensitäten.
- **Phase 3:** Aus den in Phase 2 gewonnenen Ergebnissen soll ein „Safety-Buffer“ abgeleitet werden. Sofern notwendig, wird dieser auf die Geländemodelle addiert, um die für Area 2 geforderten Genauigkeiten zu erreichen. Abschließend werden die modifizierten Datensätze nochmals verifiziert, um die Verlässlichkeit des Verfahrens zu überprüfen.

5.1 Anpassung der Formate und Verifizierung der Referenzdaten

Um eine Vergleichbarkeit der in den Untersuchungen in Betracht gezogenen Daten sicherzustellen, ist es notwendig, alle Informationen in ein einheitliches Format zu überführen. Neben einer Vereinheitlichung der Datenformate steht eine Harmonisierung der unterschiedlichen Bezugssysteme an. Hierbei muß eine sorgfältige Transformation sowohl der vertikalen als auch der horizontalen Koordinatensysteme durchgeführt werden.

Liegen alle Informationen in den angestrebten Formaten und Bezugssystemen vor, werden die als Referenz dienenden Datensätze hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Integrität überprüft. Die Vorgehensweise wird im Folgenden für die Untersuchungsgebiete Michelstadt/Odenwald bzw. Pfronten/Ostallgäu genauer beschrieben.

5.1.1 Angleichung der Bezugssysteme

Um eine Übereinstimmung der Daten sicherzustellen, müssen alle Daten in demselben horizontalen und vertikalen Bezugssystem vorliegen.

Aus diesem Grund werden alle Datensätze in das von der ICAO [ICA97] vorgeschriebene geographische Koordinatensystem WGS84 überführt, sofern die Daten nicht schon entsprechend vorliegen. Die Konvertierung erfolgt mit Hilfe des Softwarepaketes ArcInfo 9.1 der Firma ESRI. Die Korrektheit der Koordinatentransformation wird abschließend durch einen visuellen Vergleich überprüft.

Als vertikales Bezugssystem wird entgegen der Vorgabe durch die ICAO nicht das sich auf ein Gravitationsmodell der Erde beziehende EGM96 gewählt, sondern die auf das WGS84 Rotationsellipsoid bezogene Höhenreferenz. Diese Entscheidung erfolgt aufgrund der Tatsache, daß die zur Verifizierung vor Ort vermessenen Kontrollpunkte und die daraus entstandenen Datenprodukte als vertikales Bezugssystem das WGS84 Ellipsoid zugrunde legen [Leic99]. Um einen Transformationsfehler bereits bei den primären Referenzdaten zu vermeiden, wird hier auf eine Konvertierung verzichtet. Weichen andere in die Untersuchung einfließende Datensätze von dem WGS84 Bezugssystem ab, werden die Höhenwerte mit der

Software ERDAS IMAGINE 8.7 von Leica Geosystems in das gewünschte Format konvertiert.

5.1.2 Verifizierung der Referenzgeländemodelle

Um flächenhafte Höheninformationen zur Analyse und Bewertung der zu untersuchenden Geländedaten bereitzustellen, ist es notwendig Referenzgeländemodelle heranzuziehen. Jedoch müssen auch diese hinsichtlich ihrer Eignung als Kontrolldatensatz überprüft werden. Diese Untersuchung kann nur anhand von Kontrollpunkten durchgeführt werden, die allerdings aufgrund ihrer meist begrenzten Anzahl nur einen stichprobenartigen Charakter aufweisen. Sollte der als Referenz verwendete Höhendatensatz von einem kommerziellen Anbieter bereitgestellt werden, besteht neben einer Überprüfung noch die Möglichkeit, die vom Erzeuger angegebenen Qualitätsparameter in die Bewertung einfließen zu lassen.

5.1.2.1 Verifizierung der Referenzhöheninformationen Michelstadt/Odenwald

Das in Abschnitt 4.3.3 beschriebene photogrammetrische Höhenmodell wurde mit dem Ziel erstellt, die zu analysierenden Datenquellen für das Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald bewerten zu können. Allerdings muß hierzu bekannt sein, ob das Höhenmodell den Ansprüchen einer Referenz genügt, die zur Verifizierung eines DOM verwendet werden soll. Neben den während der Orientierung des Bildmaterials und Generierung des Höhenmodells üblichen Qualitäts- und Plausibilitätskontrollen [Pau05] [FSL01] wird abschließend der automatische Generierungsprozeß überprüft. Hierzu werden 148 Kontrollpunkte aus dem durch Differential-GPS Paßpunkte geo-referenzierten Luftbilderblock ermittelt. Abbildung 5.1 zeigt die Verteilung der eingemessenen Kontrollpunkte über das Referenzgebiet.

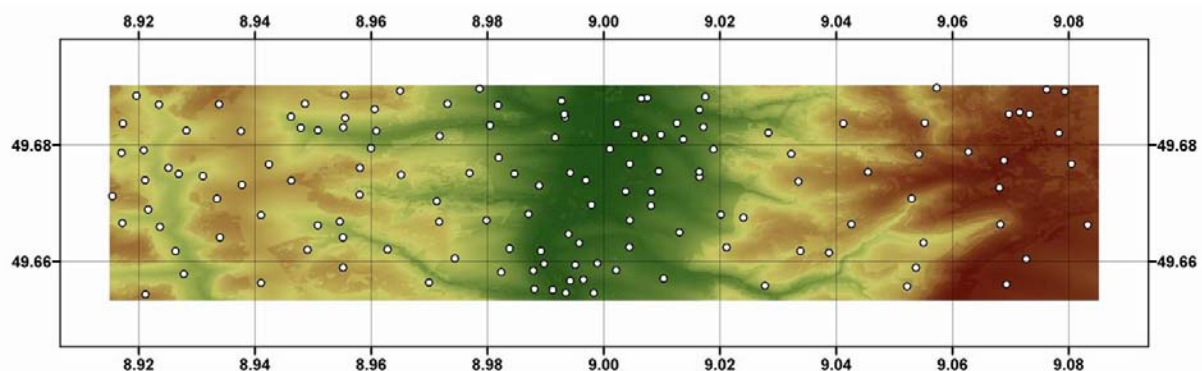


Abbildung 5.1: Lage der Kontrollpunkte im Referenzgebiet Michelstadt

Die einzelnen Punkte wurden durch einen Operator manuell mit Mitteln der Stereo-Photogrammetrie eingemessen und geben die Höhen verschiedener Objekte wieder. Zum einen erfolgten Messungen in der Ebene, die z.B. Wiese, Acker und städtische Freiflächen repräsentieren. Zum anderen werden Punkte auf den Oberflächen von Gebäuden sowie Wäldern betrachtet. Schließlich werden die Kontrollpunkte auf die Oberfläche des Geländemodells projiziert, woraus sich die Differenz zwischen Meßpunkten und Höhenmodell ableiten läßt.

Aus den Ergebnissen kann schließlich die Genauigkeit des Referenzmodells bestimmt werden [HEK05]. Abbildung 5.2 zeigt die Verteilung der Differenzen über die verschiedenen Oberflächentypen. Es läßt sich erkennen, daß die automatische Generierung von Höhendaten in einer stereo-photogrammetrischen Umgebung zuverlässiger für Flächen ohne eine signifikante Bedeckung wie Feld, Wiese und Freiflächen funktioniert als für Bereiche mit Gebäuden oder Wald.

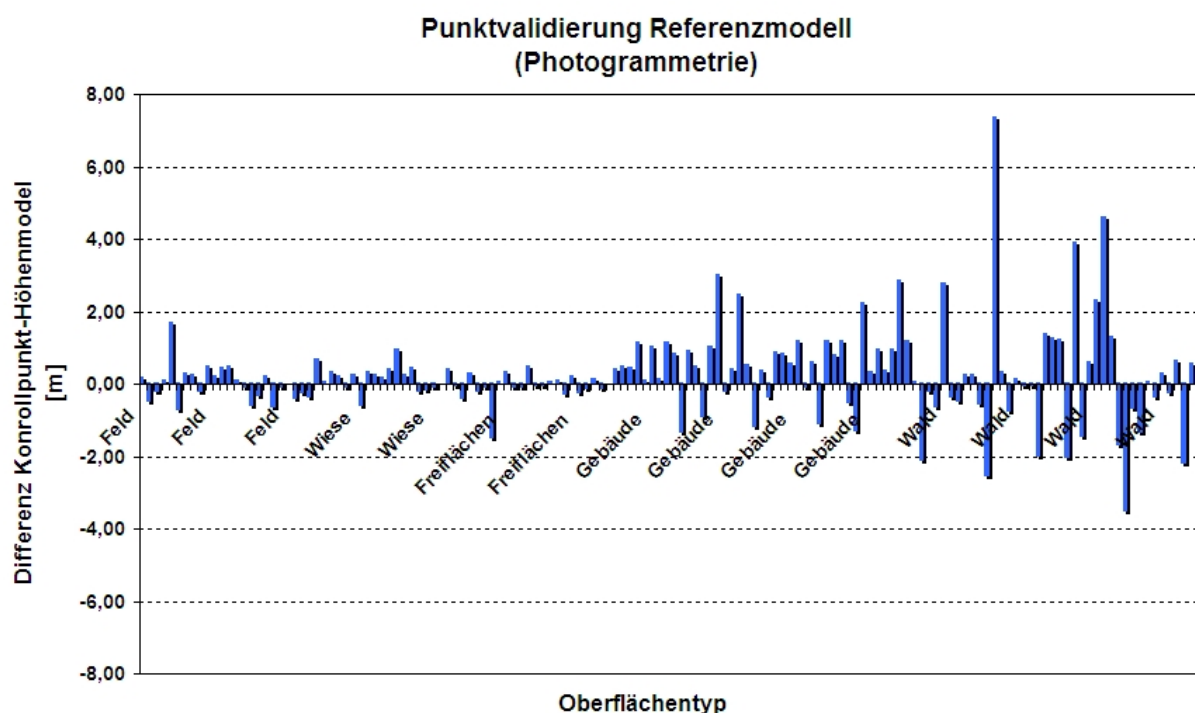


Abbildung 5.2: Kontrollpunkt-Referenzmodellvergleich Michelstadt

Auch die in Tabelle 5.1 dargestellten Qualitätsparameter der Kontrollpunkt-Referenzmodellanalyse zeigen, daß die Integrität des Referenzmodells in unbedeckten Bereichen (2D) höher ist als in Bereichen mit einer signifikanten Bedeckung (3D).

Eine Betrachtung des Höhenmodells entlang der verschiedenen Qualitätsparameter zeigt, daß der automatische Generierungsprozeß durchaus zuverlässig arbeitet. Die Standardabweichung der Höhendifferenz bei einem Sigma (σ) liegt bei 1,21 m, der Mittelwert bei 0,22 m und die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% bei 1,14 m. Aufgrund dieser Ergebnisse kann die Eignung des photogrammetrisch erstellten Geländemodells als Höhenreferenz für die Verifizierung von digitalen Oberflächenmodellen bestätigt werden.

Tabelle 5.1: Analyse Kontrollpunkt-Referenzmodellvergleich Michelstadt

| Geländemodell | max. Diff._{2D} [m] | max. Diff._{3D} [m] | σ_{2D} [m] | σ_{3D} [m] | σ_{ges} [m] | mittl. Abweich. [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Photogrammetrie | 1,67 | 7,35 | 0,42 | 1,58 | 1,21 | 0,22 | 1,15 |

5.1.2.2 Verifizierung der DGM5 Höhenmodelle

Die von den Landesvermessungsämtern bereitgestellten DGM5 Geländemodelle sollen zum einen dazu verwendet werden, Neigungskartierungen zu berechnen, aus denen später die entsprechenden Steigungsklassen erstellt werden können. Zum anderen sollen diese Datensätze, sofern es die Qualität der Höheninformationen zuläßt, als Referenzhöhenmodelle verwendet werden. Allerdings kann dies nur mit Einschränkungen geschehen, da die DGM5 Datensätze ein Geländemodell wiedergeben. Da die von den Datenanbietern in Abschnitt 4.3.4 gezeigten Genauigkeitsangaben zum Teil sehr ungenau sind, bedarf es auf jeden Fall einer Verifizierung der Datensätze.

Region Pfronten/Ostallgäu:

Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit für den alpinen Bereich im Untersuchungsgebiet Pfronten/Ostallgäu auf keinen Datensatz zugegriffen werden kann, der das Potential für eine Kontrolle hinsichtlich eines DOM anbietet, werden die DGM5 Höheninformationen sowohl für die Neigungskartierung, wie auch als Referenzhöhenmodell benötigt. Aus diesem Grund müssen schließlich aussagekräftige Qualitätsparameter ermittelt werden, die letztendlich eine Bewertung dieses Datensatzes zulassen.

Auch wenn der hier betrachtete Datensatz ein DGM wiedergibt und die zu untersuchenden Datensätze hinsichtlich eines DOM bewertet werden sollen, kann das DGM5 als Referenzmodell jenseits der Baumgrenze und für Gebiete ohne signifikante Bodenbedeckung (z.B. Wiesen) herangezogen werden. Um zu überprüfen, ob die Daten eine Genauigkeit aufweisen, die für ihre Eignung als Referenzwerte spricht, wird das DGM5 ebenfalls mit Hilfe von Kontrollpunkten verifiziert.

Die Kontrollpunkte wurden während einer Vermessungskampagne am 08.07.2007 und 12.07.2007 mit Hilfe eines Leica Differential-GPS (Leica GPS 500) vor Ort aufgenommen. Die Vermessung erfolgte ohne die Einrichtung eines Referenzmeßplatzes, da die zu einer Ausgleichsrechnung benötigten Korrekturdaten eines Differential-GPS durch die Bayerische Vermessungsverwaltung (BVV) in Form des Datenproduktes SAPOS zur Verfügung gestellt wurden. Die Korrekturdaten wurden von der SAPOS-Referenzstation in Wertach/Allgäu aufgenommen, die sich in ca. 15 km Entfernung von dem Untersuchungsgebiet befindet. Insgesamt konnten 57 auswertbare Kontrollpunkte eingemessen werden, wobei im Zentrum der Vermessung die Berge Aggenstein sowie der Breitenberg standen. Von besonderem Interesse waren die weitgehend vegetationslosen steilen Abhänge des Aggensteins (siehe Abbildung 5.3).

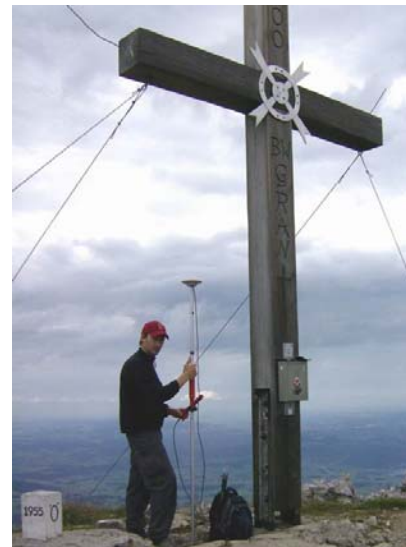


Abbildung 5.3: Vermessung von Kontrollpunkten am Aggenstein bei Pfronten

Außerdem wurden Kontrollpunkte auf der Westseite des Breitenberges sowie in den Tallagen östlich von Pfronten/Meilingen erfaßt. Die Geländeneigungen der vermessenen Regionen des Breitenberges können im Vergleich zu denen des Aggensteins als gemäßigt bezeichnet werden. Bei den eingemessenen Bereichen bei Pfronten/Meilingen handelt es sich um Weidegebiete, die nur geringe Steigungswechsel aufweisen. Insofern drei Abschnitte mit einer unterschiedlichen Charakteristik hinsichtlich ihrer Geländeneigung aufgenommen wurden, ergibt sich die Möglichkeit, anhand der Kontrollpunkte den Einfluß der Geländeneigung zu untersuchen.

Bei den vor Ort eingemessenen Kontrollpunkten handelt es sich ausnahmslos um Bodenpunkte. Bei der Vermessung wurde darauf geachtet, daß die Kontrollpunkte an Stellen aufgenommen wurden, an denen keine signifikante Vegetation vorgefunden wurde, um eine Störung der GPS Signale zu vermeiden. Zusätzlich können diese Punkte auch zur Verifizierung der SRTM Höhendaten herangezogen werden. Die Verteilung der Kontrollpunkte über das Untersuchungsgebiet bei Pfronten kann Abbildung 5.4 entnommen werden.

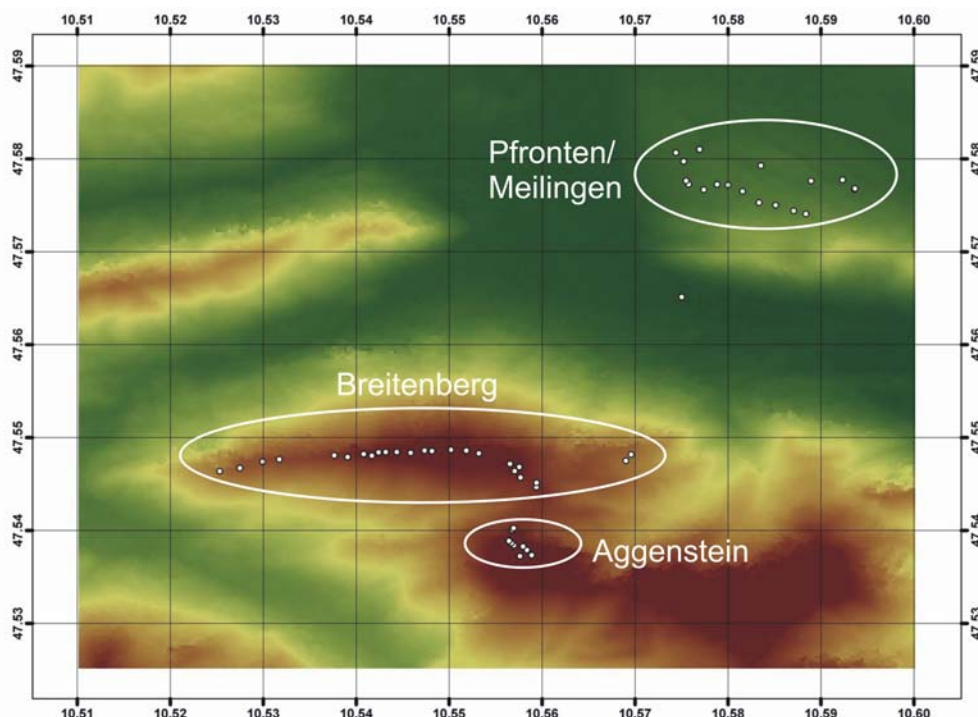


Abbildung 5.4: Verteilung der Kontrollpunkte im Untersuchungsgebiet Pfronten

Die Bestimmung der Qualitätsparameter erfolgt wie bereits in Abschnitt 5.1.2.1 beschrieben durch eine Projektion der Kontrollpunkte auf das DGM5. Aus den Abweichungen werden die in Tabelle 5.2 dargestellten Qualitätsparameter ermittelt.

Tabelle 5.2: Analyse Kontrollpunkt-DGM5 Höhenmodell/Pfronten

| Geländemodell | max. Differenz [m] | σ [m] | mittl. Abweichung [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| DGM5 / gesamt | 9,01 | 2,85 | 1,35 | 5,40 |
| Aggenstein | 7,92 | 3,42 | 3,02 | 7,85 |
| Breitenberg | 9,01 | 3,24 | 1,09 | 5,12 |
| Pfronten/Meilingen | 1,81 | 0,78 | 0,83 | 1,55 |

Die ermittelten Ergebnisse weisen nicht die erhoffte Qualität auf, wie sie für das photogrammetrisch erstellte Referenzgebiet im Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald erreicht wurde. Dabei sollte allerdings berücksichtigt werden, daß die Ergebnisse eines Höhenmodells mit 10 m Stützstellenabstand, insbesondere in Regionen mit großen Steigungswechseln, nicht dasselbe Maß an Genauigkeit bereitstellen können wie Geländemodelle mit einer geringeren Rastergröße. Anhand der Unterteilung der Ergebnisse in einzelne Regionen des Vermessungsgebietes zeigt sich, daß mit einer steigenden Rauigkeit des Geländes die Genauigkeit des Datensatzes abnimmt.

Aus Mangel an Alternativen wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchung das DGM5 Höhenmodell dennoch als Referenzdatensatz herangezogen. Allerdings sollen bei den weiteren Analysen, die auf der Basis dieses Datensatzes durchgeführt werden, die gewonnenen Erkenntnisse mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Kontrollpunkte überprüft werden.

Region Michelstadt/Odenwald:

Das für das Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald vorliegende DGM5 soll zum einen zur Erstellung der Steigungsklassifizierung herangezogen werden, zum anderen soll dieser Datensatz als Referenz für die Bereiche dienen, die nicht durch das photogrammetrisch erstellte DOM abgedeckt sind. Allerdings kann aufgrund der Tatsache, daß der DGM5 Datensatz nur den nackten Boden wiedergibt, nur eine Verifizierung von Gebieten ohne signifikante Bedeckung wie Ackerland oder Wiesen erfolgen.

Die Bestimmung der Qualitätsparameter erfolgt auch hier mit Hilfe von Kontrollpunkten. Wie bei der Analyse der photogrammetrisch erstellen Höhendaten, werden die mittels eines Operators aus der stereo-photogrammetrischen Umgebung eingemessenen Punkte herangezogen. Dabei werden für diese Analyse nur Bodenpunkte in Betracht gezogen. Die Qualitätsparameter für das DGM5 des HVBG können Tabelle 5.3 entnommen werden.

Tabelle 5.3: Analyse Kontrollpunkt-DGM5 Höhenmodell/Michelstadt

| Geländemodell | max. Diff. [m] | σ [m] | mittl. Abweichung [m] | Genauigkeit 90% [m] |
|----------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| DGM5/Odenwald | 15,76 | 2,35 | 0,21 | 0,80 |

Für das Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald, welches im Vergleich zu dem Untersuchungsgebiet bei Pfronten die moderate Rauigkeit eines Mittelgebirges aufweist, zeigt sich, daß die Genauigkeit dieses DGM mit der des photogrammetrischen Referenzoberflächenmodells verglichen werden kann. Soweit Gebiete verifiziert werden sollen, die keine nennenswerte Bedeckung aufweisen, kann somit dieses Modell zu Vergleichszwecken bedenkenlos herangezogen werden.

5.2 Verifizierung der zu untersuchenden Geländemodelle

Nachfolgend sollen die mit Methoden der Fernerkundung erstellten Radar- und Laser-Höhenmodelle hinsichtlich ihrer Genauigkeit untersucht werden. In einem ersten Schritt werden dazu die Datensätze mit den Kontrollpunkten, die auch zur Verifizierung der Referenzdaten herangezogen wurden, verglichen. In einem nächsten Schritt werden die kompletten Datensätze mit denen der Referenzdatensätze abgeglichen (vgl. Abschnitt 4.5.2).

Basierend auf diesen Differenzmodellen sollen schließlich die Einflüsse der verschiedenen Oberflächeneigenschaften quantifiziert werden. Zunächst wird dazu anhand des Untersuchungsgebietes Michelstadt/Odenwald der Einfluß der Bodenbedeckung betrachtet und die Abweichungen hinsichtlich eines echten Oberflächenmodells bestimmt. Diese Untersuchungen werden sowohl für die SRTM C- und X-Band Höhenmodelle wie auch für die LIDAR Höhenmodelle durchgeführt.

Anschließend soll überprüft werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Reflektionsintensität und der Fehlergröße eines Höhenmodells nachgewiesen werden kann. Hierbei wird ein besonderes Augenmerk auf die SRTM X-Band und LIDAR Höhenmodelle des Untersuchungsgebietes Michelstadt/Odenwald gelegt.

Abschließend wird betrachtet, inwieweit eine eindeutige Fehlergröße in Abhängigkeit der Rauigkeit eines Geländeabschnittes nachgewiesen werden kann. Diese Betrachtungen sollen sowohl für das Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald wie auch den Bereich um Pfronten/Ostallgäu erfolgen, wobei die alpinen Regionen in diesem Zusammenhang von

besonderem Interesse sind. Abschließend soll für das SRTM X-Band Höhenmodell analysiert werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Intensität des Radarechos und der Fehlerverteilung des Differenzhöhenmodells hergestellt werden kann.

Basierend auf den in diesem Kapitel gewonnenen Ergebnissen sollen entsprechende „Safety Buffer“ bestimmt werden, die es erlauben, die untersuchten Datensätze an die in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Anforderungen an Geländedaten für Luftfahrtanwendungen anzupassen.

5.2.1 Bestimmung der Qualitätsparameter mit Hilfe von Kontrollpunkten

In einem ersten Untersuchungsschritt werden analog zu den Referenzmodellen für alle weiteren zu bewertenden Geländemodelle die Qualitätsparameter bestimmt. Neben ersten Einschätzungen zur Qualität der verschiedenen Datensätze ermöglicht diese Analyse die Ergebnisse, die auf einem Vergleich ganzer Datensätze beruhen, auf ihre Plausibilität hin zu prüfen.

5.2.1.1 Kontrollpunkt Verifizierung des HVBG Laser Höhenmodells (2000)

Für eine Bewertung der Laserscanning Geländemodelle im zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes Michelstadt/Odenwald mit Hilfe von Kontrollpunkten, steht lediglich das Höhenmodell mit einem 10 m Stützstellenabstand zur Verfügung, welches durch die Befliegung der Firma Eurosense im Jahre 2000 gewonnen wurde. Die während der Vermessung im Jahr 2004 aufgezeichneten Gebiete liegen nur nördlich und südlich des durch die TUD erstellten Referenzoberflächenmodells vor. Für diese beiden zusätzlichen Bereiche stehen keine Kontrollpunkte zur Verfügung. Zur Verifizierung dieser Bereiche wurde auf die Erfassung von Paßpunkten vor Ort verzichtet, da so nur Bodenpunkte hätten gewonnen werden können. Demnach könnten nur Bereiche analysiert werden, die keine signifikante Bodenbedeckung aufweisen. Die Verifizierung dieser Gebiete soll später mit Hilfe des DGM5 Geländemodells durchgeführt werden.

Wie in Abschnitt 4.5.1 beschrieben, wurden die Kontrollpunkte auf das Geländemodell projiziert und die Differenzen zwischen den Höhenwerten ermittelt. Neben der Ermittlung der Qualitätsparameter, die alle Kontrollpunkte berücksichtigen, wurden auch die Genauigkeiten für die Bodenpunkte (2D) und die Nicht-Bodenpunkte (3D) bestimmt. Die Ergebnisse der Analyse des Datensatzes sind Tabelle 5.4 zu entnehmen.

Tabelle 5.4: Analyse Kontrollpunkt-Laser HLVA/Odenwald

| Geländemodell | max. Diff. [m] | σ [m] | mittl. Abweichung [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|----------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Laser gesamt | 31,14 | 6,27 | 4,21 | 13,20 |
| Laser 2D | 3,16 | 0,75 | 0,76 | 1,25 |
| Laser 3D | 31,14 | 7,31 | 7,01 | 17,11 |

Es zeigt sich, daß dieser Datensatz bezüglich einer Abbildung der Bodenpunkte sehr gute Ergebnisse liefert. Hinsichtlich seiner Eignung als DOM bestehen jedoch deutliche Defizite. Diese beruhen vermutlich auf der Tatsache, daß die LIDAR Befliegung in den Wintermonaten durchgeführt wurde und somit eine geringe Vegetationsdichte (z.B. Laubfreiheit) das Durchdringen der Strahlung ermöglichte. Ob sich diese Annahme bestätigen läßt, soll in weiteren Verifizierungsschritten untersucht werden.

5.2.1.2 Kontrollpunktverifizierung des SRTM X-Band Höhenmodells

Eine Kontrollpunktverifizierung der SRTM X-Band Daten erfolgte sowohl für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt wie auch für den alpinen Geländeabschnitt bei Pfronten. Neben einem ersten Eindruck über den Einfluß der Oberflächenbedeckung konnte somit auch ein Einblick in die Auswirkung der Geländesteigung gewonnen werden. Aus diesem Grund

wurde das Untersuchungsgebiet bei Pfronten in drei Bereiche aufgeteilt, die eine unterschiedliche Charakteristik aufwiesen. Während das Gebiet am Aggenstein große Neigungswechsel aufweist, wurden Kontrollpunkte auf dem Kamm des Breitenberges aufgenommen, der in seinem Verlauf leichtes bis mittleres Gefälle aufweist. Zuletzt wurden die Referenzdaten im Bereich Pfronten/Meilingen eingemessen. Das dort vermessene Gebiet weist einen welligen Charakter ohne starkes Gefälle auf.

Die Ergebnisse der Kontrollpunktverifizierung der SRTM X-Band Daten können Tabelle 5.5 entnommen werden. Auch hier konnte für das Untersuchungsgebiet in der Umgebung von Michelstadt bei der Bestimmung der Qualitätsparameter mit Hilfe der Kontrollpunkte nach Bodenpunkten (2D) und Nicht-Bodenpunkten (3D) unterschieden werden.

Tabelle 5.5: Analyse Kontrollpunkt - SRTM X-Band Geländemodell

| Geländemodell | max. Diff. [m] | σ [m] | mittl. Abweichung [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|-----------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <i>Michelstadt/Odenwald</i> | | | | |
| Gesamt | 38,73 | 4,92 | 6,46 | 10,90 |
| 2D | 11,83 | 3,41 | 3,53 | 7,90 |
| 3D | 38,73 | 4,64 | 8,94 | 13,25 |
| <i>Pfronten/Ostallgäu</i> | | | | |
| gesamt | 51,67 | 9,33 | 4,45 | 12,50 |
| Pfronten/Meilingen | 10,45 | 3,89 | 0,08 | 3,30 |
| Breitenberg | 14,86 | 3,73 | 6,63 | 12,40 |
| Aggenstein | 51,67 | 21,89 | 7,42 | 33,00 |

Betrachtet man die errechneten Werte der X-Band Höhenmodell Verifizierung in Michelstadt, erkennt man, daß die geforderte Genauigkeit von 3 Metern bei einem Konfidenzintervall von 90% nicht erreicht werden konnte. Diese liegt für das gesamte Modell bei 10,90 m. Ein Blick auf den Mittelwert der Differenz (mittlere Abweichung) zwischen Untersuchungsgebiet und Referenzdaten zeigt, daß das Höhenmodell insgesamt 6,46 m niedriger ist als die durch die Kontrollpunkte abgebildeten wirklichen Höhen. Betrachtet man schließlich die Differenzen für die Nichtbodenpunkte, zeigt sich, daß auch hier die angestrebten Genauigkeiten mit einer mittleren Differenz von 3,53 m und einer Genauigkeit (90%) von 7,90 m nicht erreicht werden konnten. Wie zu erwarten war, weichen die Ergebnisse für die Nichtbodenpunkte noch wesentlich stärker von der Referenz ab. Hier beträgt die mittlere Differenz 8,94 m und die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% liegt bei 13,25 m.

Die Betrachtung der erhobenen Qualitätsparameter für das Untersuchungsgebiet bei Pfronten zeigt, daß die mittlere Abweichung um 2,01 m geringer (4,45 m) ist als im Untersuchungsgebiet Michelstadt. Allerdings weist die Genauigkeit (Konfidenzintervall 90%) einen Wert von 12,50 m auf, welcher nochmals um 1,60 m unter dem Wert des Odenwaldes liegt. Diese größere Ungenauigkeit läßt sich durch den Einfluß der Geländesteigung des alpinen Untersuchungsgebietes erklären. Diese Annahme scheint sich zu bestätigen, wenn die Qualitätsparameter des Untersuchungsgebietes Pfronten, unterteilt nach den einzelnen Geländeabschnitten, betrachtet werden. Hier zeichnet sich ab, daß mit einer zunehmenden Geländesteigung die Genauigkeit des Geländemodells signifikant abnimmt. Während in dem Abschnitt Pfronten/Meilingen eine Genauigkeit (Konfidenzintervall 90%) des Geländemodells hinsichtlich der Referenz von 3,30 m erreicht werden konnte, betrug dieser Wert auf dem Breitenberg bereits nur noch 12,40 m. Auf dem Aggenstein mit seinen sehr großen Neigungswechseln betrug die Genauigkeit sogar nur 33,00 m.

Zusammenfassend läßt sich nach der Kontrollpunktanalyse der SRTM X-Band Daten feststellen, daß die X-Band Höhenmodelle insgesamt niedriger sind als die Referenzwerte, die die wirklichen Gegebenheiten repräsentieren. Diese Tatsache läßt sich auf die Eigenschaften der Radarstrahlung zurückführen, welche die bestrahlten Oberflächen penetrieren (vgl. Abschnitt 2.2.2). Besonders deutlich wird dies bei den Ergebnissen für die Nichtbodenpunkte, die zumeist Waldgebiete wiedergeben. Hier nimmt die Genauigkeit im Gegensatz zu den Bodenpunkten weiter ab. Weiterhin wird deutlich, daß auch die Geländeneigung einen deutlichen Einfluß auf die Genauigkeit der Höheninformationen hat. Inwieweit sich diese ersten Tendenzen nach der Kontrollpunktanalyse bestätigen lassen, soll später bei dem Vergleich von ganzen Geländemodellen, unter der Berücksichtigung der einzelnen Einflußfaktoren, geprüft werden.

5.2.1.3 Kontrollpunktverifizierung des SRTM C-Band Höhenmodells

Wie für das X-Band Geländemodell wurden die Kontrollpunkte auf die C-Band Höhendaten projiziert. Die Ergebnisse dieser Analyse können Tabelle 5.6 entnommen werden.

Tabelle 5.6: Analyse Kontrollpunkt-SRTM C-Band Geländemodell

| Geländemodell | max. Diff. [m] | σ [m] | mittl. Abweichung [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|-----------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <i>Michelstadt/Odenwald</i> | | | | |
| Gesamt | 38,97 | 5,79 | 3,68 | 9,50 |
| 2D | 12,14 | 3,26 | -0,41 | 2,40 |
| 3D | 38,97 | 5,23 | 7,08 | 10,70 |
| <i>Pfronten/Ostallgäu</i> | | | | |
| Gesamt | 100,15 | 17,4 | 12,76 | 24,0 |
| Pfronten/Meilingen | 14,05 | 4,70 | -1,06 | 5,1 |
| Breitenberg | 38,47 | 9,06 | 17,78 | 24,5 |
| Aggenstein | 100,15 | 32,88 | 32,37 | 68,0 |

Für das Untersuchungsgebiet Michelstadt weisen die C-Band Daten eine größere Genauigkeit auf als das X-Band Höhenmodell. Die Genauigkeit (Konfidenzintervall 90%) für das gesamte Untersuchungsgebiet liegt bei 9,50 m. Für die Bodenpunkte beträgt diese 2,40 m und für die Nichtbodenpunkte 10,70 m. Für die Nichtbodenpunkte kann eine mittlere Abweichung von minus 0,41 m bestimmt werden. Dies bedeutet, daß das Höhenmodell für diese Bereiche höher liegt, als die Referenzwerte.

Für das Untersuchungsgebiet bei Pfronten sind die Ergebnisse im Vergleich zu den der X-Band Daten konträr. Hier liegt die Genauigkeit (Konfidenzintervall 90%) weit unter der des X-Bandes. Für den Abschnitt in Pfronten/Meilingen konnte eine Genauigkeit von 5,10 m, für den Breitenberg 24,50 und für den Aggenstein von 68,00 m errechnet werden. Die hier ermittelten Werte sind somit in etwa doppelt so hoch wie jene des X-Band Geländemodells.

Nach einer ersten Analyse der C-Band Daten zeigt sich, daß für das Untersuchungsgebiet Michelstadt die Genauigkeit der Höheninformation größer ist als bei den X-Band Daten. Dieses Ergebnis konnte nicht unbedingt erwartet werden, da wie in Abschnitt 2.2.2.1 beschrieben, mit einem stärkeren Eindringen der langwelligeren C-Band Mikrowellen in die Oberflächen zu rechnen war (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die Tatsache, daß wie unter Abschnitt 4.3.1 beschrieben, das 90 m C-Band Höhenmodell durch Interpolation des 30 m Basismodells entstanden ist, konnte die zufälligen Störungen und Fehler vermindern. Diese Tatsache macht sich nun im Untersuchungsgebiet Michelstadt bemerkbar.

Für das Untersuchungsgebiet bei Pfronten zeigt sich, daß die Genauigkeiten für das C-Band Modell bei zunehmender Geländeneigung schlechtere Ergebnisse liefern. Inwieweit hierbei der Stützstellenabstand einen maßgeblichen Einflußfaktor für die gewonnenen Ergebnisse darstellen könnte, soll in den nachfolgenden Untersuchungen genauer bestimmt werden.

5.2.2 Verifizierung mit Hilfe von Referenzgeländemodellen

Da die Verifizierung mit Hilfe von Kontrollpunkten nur eine stichprobenartige Bewertung ausgewählter Punkte erlaubt, sollen die in den vorangegangenen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse durch einen Vergleich von fortlaufend zusammenhängenden Höheninformationen bestätigt werden. Hierzu kommt das in Abschnitt 5.2.2 beschriebene Verfahren zum Einsatz, bei dem von einem Referenzdatensatz der zu untersuchende Datensatz subtrahiert wird. Dieser Vergleich von ganzen Geländemodellen wird sowohl für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt wie auch für den alpinen Bereich bei Pfronten durchgeführt.

5.2.2.1 Bewertung der Geländemodelle im Bereich Michelstadt/Odenwald

Zur Bewertung der verschiedenen zur Verfügung stehenden Datenquellen dieses Untersuchungsgebietes kommen zum einen das an der TU Darmstadt photogrammetrisch erstellte Oberflächenmodell wie auch das Geländemodell DGM5 des HVBG zum Einsatz.

Für das Zentrum des Untersuchungsgebietes, für welches das DOM als Referenz zur Verfügung steht, können die Höhenmodelle der Laserbefliegung aus dem Jahr 2000, die SRTM X-Band wie auch die SRTM C-Band Daten, hinsichtlich ihrer Abbildung eines Oberflächenmodells verifiziert werden. Die Ergebnisse dieser Verifizierung können Tabelle 5.7 entnommen werden.

Tabelle 5.7: Referenzmodellanalyse Bereich Michelstadt/Odenwald (DOM)

| Geländemodell | max. Diff. [m] | σ [m] | mittl. Abweichung [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|----------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Laser DHM 2000 | 64,00 | 8,44 | 3,07 | 15,50 |
| X-Band DHM | 87,00 | 6,54 | 3,13 | 9,70 |
| C-Band DHM | 44,00 | 9,18 | 0,80 | 11,50 |

Um eine zusätzliche Analyse der Laserdaten aus der LIDAR Befliegung von 2004 vornehmen zu können, für die Daten nur im Bereich nördlich und südlich des zentralen Gebietes zur Verfügung stehen, muß das DGM5 als Referenz herangezogen werden. Da dieses allerdings nur eine Verifizierung hinsichtlich eines „*Bare Earth Models*“ zuläßt, werden die Ergebnisse des Datenvergleiches gesondert in Tabelle 5.8 dargestellt und diskutiert.

Betrachtet man die Ergebnisse der Referenzmodellanalyse im Bereich Michelstadt, zeigt sich, daß nach diesem Analyseschritt die Ergebnisse größtenteils denen der Kontrollpunktanalyse entsprechen. Neben kleineren Differenzen zwischen den Verifizierungstechniken konnten keine nennenswerten Ausreißer festgestellt werden.

Die Ergebnisse und Auswirkungen auf einen potentiellen Einsatz in der Luftfahrt werden im Folgenden für die einzelnen Sensortypen diskutiert.

Laser Scanning HLVA 2000

Für das Laserscanning-Höhenmodell aus dem Jahr 2000 konnte mit einer Genauigkeit von 15,50 m, bei einem Konfidenzintervall von 90%, ein um 2,30 m schlechterer Wert ermittelt werden als bei der Kontrollpunktanalyse, wobei die mittlere Abweichung 1,14 m unter dem der vorangegangenen Untersuchung liegt. Für die Standardabweichung bei einem Sigma konnte ebenfalls eine Verschlechterung von 2,17 m festgestellt werden. Dennoch können keine gravierenden Unterschiede bei den Ergebnissen der einzelnen Verifizierungsmethoden festgestellt werden, die einen Zweifel an der Richtigkeit der Ergebnisse zulassen.

Nach der Analyse der Laserscanningdaten aus dem Jahr 2000 ist allerdings überraschend, daß die angestrebten Genauigkeiten des ausgewählten Szenarios mit 3 m, bei einem Konfidenzintervall von 90%, bei weitem nicht erreicht werden können, obwohl die Laseraltimetrie üblicherweise hohe Genauigkeiten bei der Geländevermessung zuläßt. Allerdings muß in diesem Zusammenhang nochmals darauf hingewiesen werden, daß die in diesem Abschnitt untersuchten Höhendaten nicht im Originalformat vorlagen und bereits nach Boden- und Nichtbodenpunkte unterteilt wurden. Um dennoch eine möglichst dichte Punktwolke zu erhalten, wurden zur Berechnung eines Geländemodells beide Datensätze miteinander verschmolzen. Um sich jedoch einem DOM anzunähern, wurde der Maximalwertansatz verfolgt. Danach wird der höchste Wert zur Berechnung des Höhenmodells verwendet, sofern innerhalb eines Rasterabschnittes mehrere Punkte liegen. Dennoch scheint mit dieser Datengrundlage die Annäherung an ein DOM nicht zu gelingen, was sich graphisch in Abbildung 5.5 ablesen läßt.

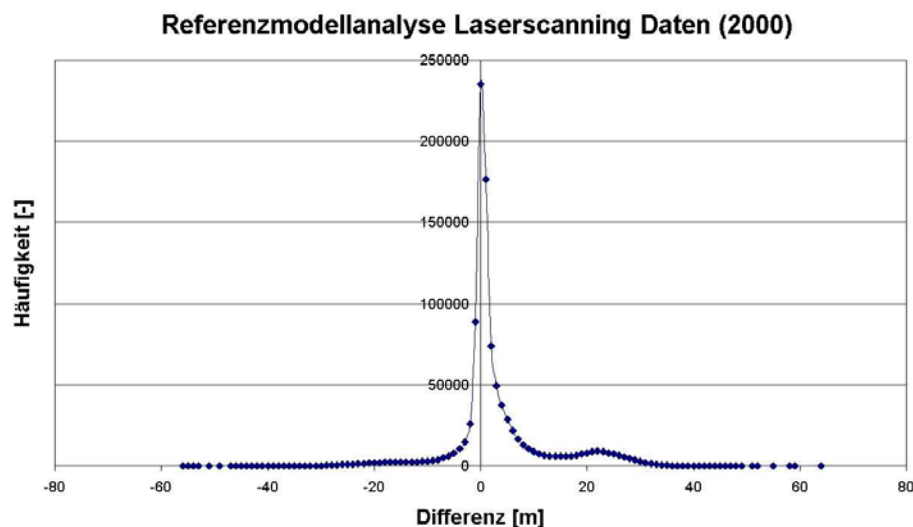


Abbildung 5.5: Fehlerverteilung Referenzmodellanalyse Laserscanning Daten (2000)

Während bei den negativen Differenzen (Geländedaten sind höher als die Referenz) eine kontinuierliche Abnahme der Häufigkeiten bei zunehmender Fehlergröße festgestellt werden kann, wird bei den positiven Differenzen (Geländemodell ist niedriger als die Differenz) im Bereich von ca. 20 bis 30 m eine auffällige Anhäufung der Werte festgestellt. Die Anhäufung in diesem Wertebereich kann darauf zurückgeführt werden, daß das Referenzmodell die Waldoberseite wiedergibt, aber im Laserscanning-Höhenmodell auch Bodenpunkte enthalten sind, welche die ungefähre Differenz einer Waldhöhe in unserer Region ausmachen. Daß der Schwerpunkt der Verteilungsfunktion im positiven Bereich liegt, weist darauf hin, daß aufgrund der enthaltenen Bodenpunkte das angestrebte DOM verfälscht wird. Auch wenn der Maximalwert der Häufigkeit über dem Nullpunkt der Differenz liegt, beträgt aufgrund dieser Verschiebung der Verteilung die mittlere Abweichung 3,07 m.

Inwieweit die einzelnen Faktoren tatsächlich einen Einfluß auf das schlechte Ergebnis haben, soll zum einen mit der Analyse des Lasermodells aus dem Jahr 2004 wie auch der topographischen Randbedingungen erfolgen.

SRTM X-Band

Für das SRTM X-Band Höhenmodell konnte für die Genauigkeit (Konfidenzintervall 90%) eine um 1,20 m niedrigere Abweichung von der Referenz festgestellt werden als bei der Kontrollpunktanalyse. Ebenfalls liegt die mittlere Abweichung um 3,33 m unter dem Wert der vorangegangenen Untersuchung, wobei die Standardabweichung bei einem Sigma um 1,62 m höher liegt. Auch hierbei gibt es keine markanten Unterschiede zwischen den Ergebnissen der

einzelnen Verifizierungsmethoden. Die Abweichungen können durch den stichprobenartigen Charakter der Referenzpunkte erklärt werden.

Betrachtet man schließlich die in Abbildung 5.6 dargestellte Verteilung der Differenzwerte aus der Referenzmodellanalyse, zeigt sich, daß auch hier der Schwerpunkt der Verteilungsfunktion auf der positiven Achse der Differenzwerte liegt.

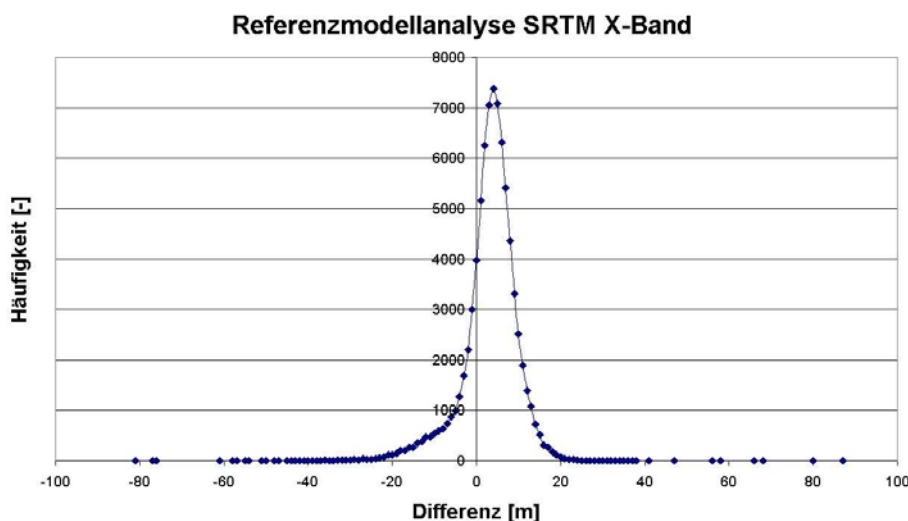


Abbildung 5.6: Fehlerverteilung Referenzmodellanalyse SRTM X-Band Daten

Dieses Ergebnis konnte erwartet werden, da, wie in Absatz 2.2.2.1 beschrieben, eine Vermessung mit Radarsystemen kein echtes DOM wiedergibt, sondern die reflektierte Oberfläche. Da es zu einem Eindringen der Strahlung in die Oberflächen kommt, ist das X-Band Modell insgesamt niedriger als das Referenzmodell. Dies läßt sich ebenfalls an der Tatsache festmachen, daß der Maximalwert der Häufigkeit nicht über dem Nullpunkt der Differenz liegt, sondern bei 4,00m.

Das hier untersuchte DLR X-Band Höhenmodell ist im Vergleich zur Referenz insgesamt zu niedrig und kann nach den durch die RTCA und ICAO festgelegten Anforderungen lediglich für den operativen Einsatz in der Enroute Phase eines Fluges verwendet werden. Wird beispielsweise eine Verwendung für den An- und Abflugbereich eines Flughafens angestrebt, muß eine Erhöhung der Zuverlässigkeit durch den Ausschluß gefährdender Einflüsse erreicht werden.

SRTM C-Band

Bei einem Vergleich der SRTM C-Band Daten mit dem Referenzmodell, konnte mit einer Genauigkeit von 11,50 m, bei einem Konfidenzintervall von 90%, ein um 2,00 m schlechterer Wert ermittelt werden als bei der Kontrollpunktanalyse. Die mittlere Abweichung beträgt 0,80 m und ist somit 2,88 m niedriger. Für die Standardabweichung bei einem Sigma wurden in der Referenzmodellanalyse 9,18 m ermittelt. Dieser Wert liegt im Vergleich zur vorangegangenen Untersuchung um 3,39 m höher.

Auffallend ist bei der Analyse der C-Band Höhendaten die mittlere Abweichung von 0,80 m, womit der Datensatz insgesamt nur geringfügig unter der Referenz liegt. Vergleicht man diese Begebenheiten mit den in Abschnitt 2.2.2.1 beschriebenen Eigenschaften des langwelligen C-Band Radars, wäre eine stärkere Penetration der Oberfläche im Vergleich zum X-Band zu erwarten gewesen und somit ebenfalls eine größere mittlere Abweichung. Allerdings liegt die Genauigkeit (Konfidenzintervall 90%) um 1,80 m unter der der X-Band Daten.

Analysiert man schließlich die Verteilung der Abweichungen zur Referenz graphisch (vgl. Abbildung 5.7), wird deutlich, daß der Schwerpunkt der Fehlerverteilung nahezu auf dem Nullpunkt der X-Achse liegt. Diese Tatsache, die sich auch in der niedrigen mittleren

Abweichung widerspiegelt, kann auf die Erstellungsmethode des 90 m C-Band Höhenmodells zurückgeführt werden. Auch hier macht sich die Mittelung der Höhenwerte des 30 m Modells, und somit die Unterdrückung des zufälligen Fehlers, bemerkbar.

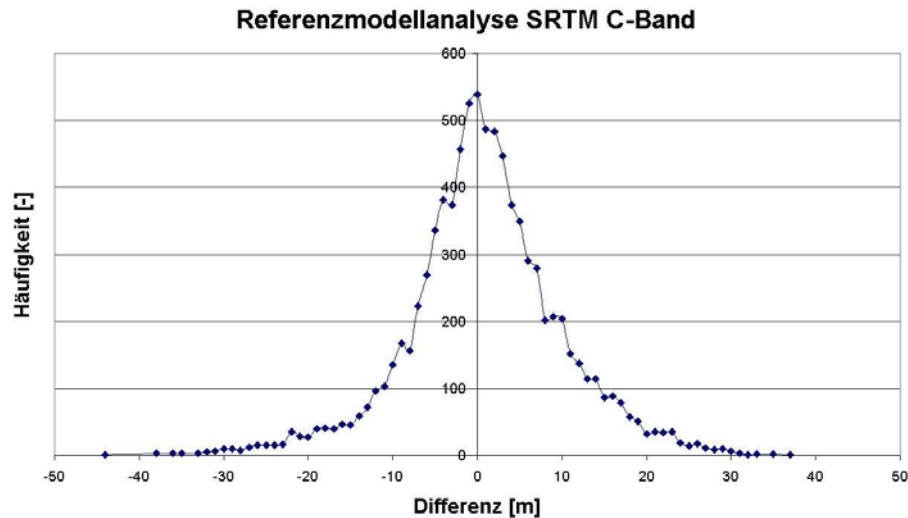


Abbildung 5.7: Fehlerverteilung Referenzmodellanalyse SRTM C-Band Daten

Ob diese für das Untersuchungsgebiet Michelstadt gewonnenen Ergebnisse für die alpine Region um Pfronten bestätigt werden können, soll ebenfalls im Rahmen der vorliegenden Untersuchung betrachtet werden. Darüber hinaus soll die Analyse der topographischen Gegebenheiten Aufschluß über das Zustandekommen der Fehler bringen.

Laser Scanning HVBG 2004

Als vierter Datensatz im Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald sollen schließlich die Laserscanning Daten aus dem Jahr 2004 verifiziert werden. Da dieser Datentyp nicht für das zentrale Referenzgebiet vorliegt, können diese Höheninformationen auch nicht mit dem photogrammetrisch erstellten Oberflächenmodell verglichen werden. Aus diesem Grund werden die LIDAR Geländemodelle schließlich dem DGM5 des HVBG gegenübergestellt. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen stellt nun der Boden ohne Bedeckung die Bezugebene dar.

Untersucht werden die LIDAR Höhenmodelle in zwei Gebieten, die nördlich bzw. südlich des zentralen Untersuchungsgebietes liegen. Für jedes Gebiet stehen wiederum zwei Höhenmodelle zur Verfügung: zum einen die Höhendaten, die aus der ersten Reflektion des Laserstrahls berechnet wurden und zum anderen jene, die aus der letzten Reflektion abgeleitet sind. Wie in Abschnitt 2.2.3.2 beschrieben, soll untersucht werden, ob durch die Auswertung der ersten Reflektion ein DOM und durch die Nutzung der letzten Reflektion ein DGM erstellt werden kann. Weiterhin sollen durch die Bestimmung der Qualitätsparameter (Standardabweichung, mittlere Abweichung, Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall 90%) Aussagen über die Genauigkeit des Höhenmodells getroffen werden. Die letztendliche Bewertung, inwieweit die Höhenmodelle für einen Einsatz in der Luftfahrt geeignet sind, ist in diesem Fall erschwert, da kein direkter Vergleich mit einem DOM hoher Genauigkeit gemacht werden kann. Die Ergebnisse dieses Teils der Untersuchungen sind in Tabelle 5.8 dargestellt.

Vergleicht man für beide Untersuchungsgebiete die Qualitätsparameter der jeweiligen Reflektionen, liegen die Geländemodelle, die aus der letzten Reflektion des Laserstrahls gewonnen wurden, näher an den Referenzdaten als jene der ersten Reflektion. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da die Datensätze hinsichtlich einer Abbildung des Bodens untersucht wurden. Obwohl die Höhendaten zur gleichen Zeit mit einem identischen System

gewonnen wurden, weisen die Qualitätsparameter doch teilweise erhebliche Differenzen auf. Während für das Untersuchungsgebiet 1 für die erste Reflektion eine mittlere Abweichung von -11,60 m ermittelt werden konnte, beträgt diese im zweiten Gebiet -18,01 m. Eine ähnliche Differenz ist für die zweite Reflektion festzustellen (5,85 m). Auch die Genauigkeiten (Konfidenzintervall 90%) weisen mit -0,27 m (Gebiet 1) zu -0,62 m (Gebiet 2) für die erste Reflektion eine deutliche Differenz auf. Für die letzte Reflektion ist die Differenz mit 0,12 m nicht ganz so auffällig.

Tabelle 5.8: Referenzmodellanalyse DGM5 / Laser DHM 2004

| Geländemodell | σ [m] | mittl. Abweichung [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|--------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Gebiet 1 | | | |
| Erste Reflektion (ges.) | 11,88 | -11,60 | -0,27 |
| Erste Reflektion (2D) | 5,02 | -2,21 | -0,13 |
| Letzte Reflektion (ges.) | 9,36 | -5,82 | -0,16 |
| Letzte Reflektion (2D) | 2,76 | -1,06 | -0,12 |
| Gebiet 2 | | | |
| Erste Reflektion (ges.) | 11,81 | -18,01 | -0,62 |
| Erste Reflektion (2D) | 5,59 | -2,58 | -0,10 |
| Letzte Reflektion (ges.) | 12,11 | -11,67 | -0,28 |
| Letzte Reflektion (2D) | 3,16 | -1,26 | -0,12 |

Eine Erklärung für die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen läßt sich aus den topographischen Gegebenheiten zwischen den beiden Untersuchungsgebieten ableiten, die nur etwa 12,5 Kilometer voneinander entfernt liegen. Von besonderem Interesse ist hierbei das Verhältnis von bewaldeten und nicht bewaldeten Gebieten. Abbildung 5.8 zeigt die Untersuchungsgebiete mit der Verteilung von Wald (dunkel) und Nichtwald. (hell).



a) LIDAR Untersuchungsgebiet 1



b) LIDAR Untersuchungsgebiet 2

Abbildung 5.8: Verhältnis von Wald zu Nichtwald in den Untersuchungsgebieten

Hier wird deutlich, daß der bewaldete Anteil im Untersuchungsgebiet 2 wesentlich höher ist. Da in diesem Teil der Untersuchung hinsichtlich eines DGM verifiziert wurde, muß sich dieser Sachverhalt klar im mittleren Fehler bemerkbar machen, was durch die Ergebnisse bestätigt wird.

Auch bei der Betrachtung der Verteilung der Differenzen (Abbildung 5.9) für die erste und letzte Reflektion läßt sich dieser Unterschied deutlich erkennen. Wie schon bei der Verifizierung der Laserscanning Daten aus dem Jahr 2000 festgestellt werden konnte, ist bei der Fehlerverteilung eine Häufung der Werte im Bereich von ca. 20 m bis 30 m Differenz festzustellen. Bei dieser Untersuchung kann auch der Einfluß des Waldes bemerkt werden.

Allerdings ist im Vergleich zur Verifizierung der Laser Höhendaten aus dem Jahr 2000, die mit einem DOM durchgeführt wurden, der Einfluß des Waldes auf der negativen X-Achse festzustellen. Hier wird deutlich, daß ein DGM die Referenz darstellt.

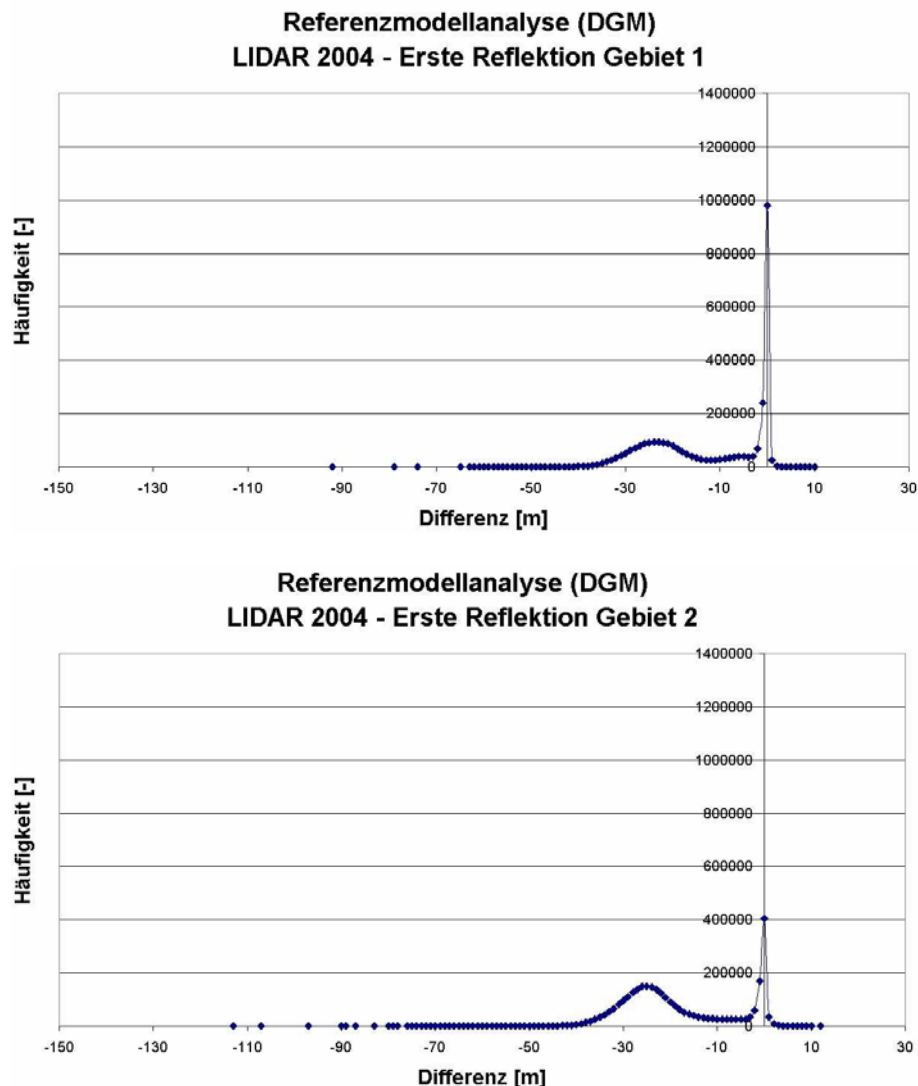


Abbildung 5.9: Fehlerverteilung der ersten Laser Reflektionen

Bei der Gegenüberstellung der Fehlerverteilungen der ersten Reflektionen für die beiden Untersuchungsgebiete wird auch hier das Verhältnis zwischen bewaldeten und nicht bewaldeten Gebieten erkennbar. Für das stärker bewaldete Gebiet ist eine wesentlich größere Häufung der Abweichungen im Bereich von etwa -20 m bis -30 m festzustellen.

Auffällig ist daneben die Streuung der Werte bei den negativen Differenzen (Untersuchungsgebiet höher als Referenz), die über die übliche Höhe eines Waldes hinaus gehen. Die Ursache dieser Fehler herzuleiten wird sich wahrscheinlich auch unter einer Berücksichtigung der topographischen Gegebenheiten im einzelnen als schwierig erweisen. Jedoch liegt die Vermutung nahe, daß unter anderem fliegende Vögel, aber auch Masten und Hochspannungsleitungen, für die großen Abweichungen verantwortlich sein könnten.

Inwieweit diese Datensätze für die Anwendung als DOM geeignet sind, läßt sich zu diesem Zeitpunkt noch nicht genau sagen und soll in den folgenden Untersuchungen genauer betrachtet werden. Allerdings kann zu diesem Zeitpunkt festgestellt werden, daß die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% sogar für die erste Reflektion sehr gute

Werte liefert und weit unter den geforderten Genauigkeiten für die Area 2 liegen, sofern ein DGM Anwendung finden würde.

Anhand der durchgeführten Analyse läßt sich sehr gut zeigen, daß angegebene Qualitätsparameter nur eine wirkliche Aussagekraft haben, wenn man die Charakteristik des abgebildeten Geländes berücksichtigt. Wurden die hier betrachteten Daten mit Hilfe desselben Sensors nahezu zeitgleich gewonnen, unterscheiden sich die Ergebnisse der Untersuchung doch teilweise erheblich.

5.2.2.2 Bewertung der Geländemodelle im Bereich Pfronten/Ostallgäu

Neben den Qualitätsanalysen im Untersuchungsgebiet Michelstadt wurde auch für den Bereich Pfronten/Ostallgäu eine Verifizierung der Höhendaten durchgeführt. Allerdings wurden hier nur die SRTM Radardaten betrachtet. Die mittels des X- und C-Band erzeugten Höhendaten wurden für dieses alpine Untersuchungsgebiet mit dem DGM5 Datensatz des BVV abgeglichen, welcher nur Informationen bezüglich des Bodens ohne Bedeckung beinhaltet.

Diese Tatsache ist für das Untersuchungsgebiet allerdings nicht so entscheidend, da hier primär der Einfluß der Geländeneigung ermittelt werden soll und im Untersuchungsgebiet, insbesondere oberhalb von ca. 1500 m, keine oder nur sehr dünne Bewaldung vorzufinden ist. Dennoch erfolgte eine Fehleranalyse für das gesamte Untersuchungsgebiet, und um den Einfluß der Vegetation weitgehend ausschließen zu können, eine gesonderte Betrachtung des Gebietes, welches über 1500 m liegt. Die im Rahmen der Untersuchung ermittelten Ergebnisse sind in Tabelle 5.9 dargestellt.

Tabelle 5.9: Referenzmodellanalyse Pfronten/Ostallgäu

| Geländemodell | σ [m] | mittl. Abweichung [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|----------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| X-Band DHM gesamt | 21,36 | -7,60 | 5,50 |
| X-Band DHM >1500m | 32,33 | -8,53 | 12,00 |
| C-Band DHM gesamt | 16,83 | -5,67 | 6,30 |
| C-Band DHM >1500m | 19,10 | -2,23 | 14,50 |

SRTM X-Band

Für die Verifizierung des gesamten SRTM X-Band Höhenmodells konnten die Ergebnisse aus der Kontrollpunktanalyse nicht bestätigt werden. Hier beträgt die Genauigkeit (Konfidenzintervall 90%) 5,50 m und ist somit um 7,00 m niedriger. Auch bei einem Vergleich mit dem Untersuchungsgebiet Michelstadt ist eine deutliche Abweichung der Ergebnisse feststellbar. Der ermittelte Wert liegt 4,20 m unter dem Resultat der vorangegangenen Untersuchung. Hingegen ist in diesem Zusammenhang überraschend, daß die Standardabweichung 12,03 m über dem Wert des Kontrollpunktvergleichs liegt. Während nach den vorangegangenen Betrachtungen der X-Band Höhendaten die mittlere Abweichung einen positiven Wert aufwies und damit die Radardaten niedriger waren als die Referenzwerte, zeigt die jetzige Analyse mit einer mittleren Abweichung von -7,60 m, daß nun die Höheninformationen insgesamt über den Vergleichswerten liegen.

Bei einer Gegenüberstellung der Qualitätsparameter des gesamten Untersuchungsgebietes Pfronten mit den Werten, die für die Region oberhalb von 1500 m gewonnen wurden, zeigt sich, daß für alle Qualitätsparameter der hochgelegenen Gebiete schlechtere Werte ermittelt werden konnten, obwohl eine deutlich verminderte Vegetationsbedeckung vorzufinden ist. Die Standardabweichung liegt um 10,97 m über dem Ergebnis des gesamten Gebietes. Die mittlere Abweichung hat sich um 0,93 m weiter vergrößert. Für die Genauigkeit

(Konfidenzintervall 90%) ist mit 12,00 m eine deutlich Verschlechterung um 6,50 m festzustellen.

Da nach einer visuellen Einschätzung die signifikanten Steigungen im Untersuchungsgebiet in den höheren Lagen vorzufinden sind, läßt sich entlang der gesonderten Darstellung der Fehler in den Regionen oberhalb von 1500 m verdeutlichen, daß eine große Rauigkeit des Geländes einen größeren Einfluß auf die Genauigkeit der Daten ausübt als die Bedeckung. Ob dieses Ergebnis auch für die C-Band Radardaten bestätigt werden kann, soll im Folgenden betrachtet werden.

SRTM C-Band

Auch für die Verifizierung des SRTM C-Band Höhenmodells konnten die Ergebnisse aus der Kontrollpunktanalyse nicht bestätigt werden. Lag die Genauigkeit (Konfidenzintervall 90%) nach der Kontrollpunktanalyse noch bei 24,00 m, beträgt diese nach dem Vergleich mit dem DGM5 des BVV nur noch 6,00 m. Auch für die mittlere Abweichung differieren die Ergebnisse auffällig. Lag nach der Kontrollpunktanalyse das C-Band Modell noch 12,76 m im Mittel unter der Referenz, zeigte sich wiederum nach dem Vergleich mit dem Referenzmodell, daß die SIR-C SRTM Daten nun 5,67 m über dem DGM5 Modell liegen. Lediglich für die Standardabweichung bei einem Sigma sind die Werte weitgehend identisch. Der Unterschied beträgt lediglich 0,57 m.

Stellt man schließlich die Ergebnisse der Referenzmodellanalysen der Untersuchungsgebiete Michelstadt und Pfronten/Ostallgäu nebeneinander, zeigt sich, daß im Mittel auch hier das alpine Gebiet eher höher ist als die Referenz und die Region um Michelstadt etwas zu niedrig abgebildet wurde.

Bei einer Gegenüberstellung des Gesamtgebietes bei Pfronten mit den Bereichen, die höher als 1500 m liegen, verschlechtert sich die Genauigkeit (Konfidenzintervall 90%) um 8,50 m, wobei sich die mittlere Abweichung um 3,44 m verringert. Die Standardabweichung verändert sich nur moderat von 16,83 m auf 19,10 m. Auch hier scheint die Rauigkeit des Geländes einen erheblichen Einfluß auf die Genauigkeit der Höheninformationen auszuüben.

Zusammenfassend läßt sich nach der hier durchgeführten Betrachtung des Untersuchungsgebietes Pfronten feststellen, daß sowohl nach der Kontrollpunktanalyse wie auch dem Vergleich der SRTM X- und C-Band Daten mit einem Referenzgeländemodell die Geländerauigkeit die Qualität der Höheninformationen stark beeinflusst. Dieser Einfluß kann scheinbar jenen der Oberflächenbedeckung durchaus übertreffen. Neben dem Einfluß der Bodenbedeckung soll schließlich auch die Auswirkung starker Neigungen in der vorliegenden Arbeit genauer untersucht werden.

5.2.3 Analyse des Einflusses der Oberflächenbedeckung

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, hängt die Qualität eines Geländemodells von Art und Beschaffenheit der vorgefundenen Oberfläche ab. Je nach Oberflächendichte kann es zu einer unterschiedlich ausgeprägten Durchdringung kommen. Dies hat zur Folge, daß insbesondere Waldflächen hinsichtlich einer Generierung eines Oberflächenmodells schlechtere Ergebnisse liefern als beispielsweise Regionen ohne signifikante Bedeckung. Doch gilt es hierbei zu beachten, daß beispielsweise die Mikrowellenstrahlung des Radars auch in dichtere Oberflächen (Böden) einzudringen vermag. Auch spielt bei der Vermessung die Jahreszeit eine nicht unerhebliche Rolle. Während Laub- und Mischwälder in den Sommermonaten durch die Belaubung eine gute Deckung aufweisen, besteht in der laubfreien Zeit ein geringerer Schutz gegen die Penetration der Strahlung. Da alle in dieser Arbeit betrachteten Geländemodelle in den Wintermonaten gewonnen wurden, muß von einer stark verringerten Vegetationsdichte ausgegangen werden. Lediglich für Nadelwälder kann ganzjährig mit ähnlichen Bedingungen gerechnet werden.

Um den Einfluß der Vegetation aber auch anderer Einflußfaktoren auf die Meßergebnisse zu bestimmen, soll im Folgenden das Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald hinsichtlich seiner topographischen Gegebenheiten untersucht werden. Dazu ist eine Klassifizierung des Untersuchungsgebietes notwendig. Die Zuordnung einzelner Flächen erfolgt wie in Abschnitt 4.6.2 beschrieben mit Hilfe des ATKIS DLM.

5.2.3.1 Selektion der topographischen Informationen

Auf der Basis des ATKIS DLM wurden schließlich 16 Oberflächenklassen bestimmt, die alle relevanten Einflußfaktoren abbilden sollen. Die Oberflächentypen sowie die in der Untersuchung verwendete Codierung der einzelnen Klassen ist Tabelle 5.10 zu entnehmen.

Tabelle 5.10: Auflistung und Codierung der topographischen Elemente

| Oberflächentyp | Codierung | Fläche [km²] |
|--------------------------|------------------|---------------------|
| <i>Bebaute Flächen</i> | 1 | 8,54 |
| <i>Verkehrsflächen</i> | 2 | 1,55 |
| Signifikante Gebäude | 3 | |
| Siedlungsfreiflächen | 4 | |
| <i>Laubwald</i> | 5 | 1,29 |
| <i>Nadelwald</i> | 6 | 12,76 |
| <i>Mischwald</i> | 7 | 9,01 |
| <i>Grünland</i> | 8 | 8,98 |
| <i>Ackerland</i> | 9 | 7,52 |
| Gartenland | 10 | |
| Gewässer | 12 | |
| Steinbrüche/Halden | 15 | |
| Unklassifizierte Flächen | 16 | |

Nach der Extraktion der definierten Klassen aus dem ATKIS Datensatz zeigte sich allerdings, daß lediglich sieben Klassen eine räumliche Ausdehnung aufweisen, die bei einer Analyse sinnvolle Ergebnisse liefern würden (siehe Abbildung 5.10).

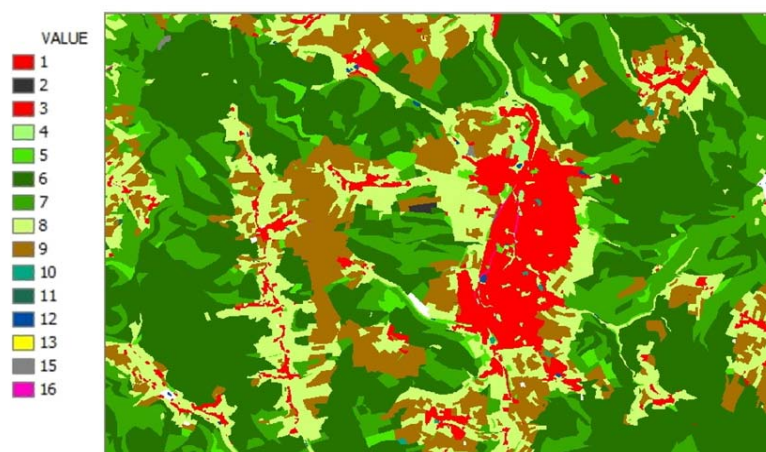


Abbildung 5.10: Topographische Elemente im Untersuchungsgebiet Michelstadt

Aus diesem Grund wurden für die Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbedeckung lediglich sieben Klassen berücksichtigt, die in Tabelle 5.10 grau hinterlegt sind. Für jede Oberflächenklasse wurde schließlich die entsprechende Fläche ermittelt, die ebenfalls in Tabelle 5.10 dargestellt ist. Die Gesamtfläche aller Kategorien beträgt 49,56 km² und bildet somit das Untersuchungsgebiet praktisch vollständig ab (siehe Abschnitt 4.4.1).

Aus dem durch Subtraktion des zu untersuchenden Datensatzes vom Referenzdatensatz gewonnenem Differenzmodell, konnten, wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben, die Gebiete gleichartiger Charakteristik bestimmt und die typenspezifischen Qualitätsmerkmale berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sollen im Folgenden vorgestellt und diskutiert werden.

5.2.3.2 Verifizierung der Höhenmodelle

Der Einfluß der Oberflächenbedeckung wird im Rahmen dieser Untersuchung nur für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt/Odenwald bestimmt. Gründe hierfür sind, daß einerseits in den bereits durchgeführten Untersuchungen der teilweise doch erhebliche Einfluß der Geländerauhigkeit dargelegt werden konnte. Andererseits ist eine fehlende Vielfaltigkeit der topographischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet bei Pfronten/Ostallgäu festzustellen. Aus diesem Grund scheint diese Region nur bedingt geeignet zu sein, um den Einfluß der Oberflächenbedeckung exakt bestimmen zu können.

Wie bei der Analyse von kompletten Höhenmodellen werden in diesem Analyseschritt die Qualitätsparameter, Standardabweichung bei einem Sigma, mittlere Abweichung und Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90%, bestimmt. Allerdings werden pro Datensatz sieben Betrachtungen durchgeführt, um darzulegen, wie, und unter welchen Bedingungen, sich die in Abschnitt 5.2.2.1 ermittelten Abweichungen zusammensetzen. Die für das zentrale Untersuchungsgebiet ermittelten Differenzen hinsichtlich des Referenzoberflächenmodells können Tabelle 5.11 entnommen werden. Die Verifizierung wurde in diesem Teil der Analyse wiederholt mit Hilfe des photogrammetrisch erstellten DOM durchgeführt.

Tabelle 5.11: DHM Analyse -Einfluß der Oberflächenbedeckung

| Geländemodell/ Qualitätsparameter | Bebaute Flächen | Verkehrs- flächen | Laub- wald | Nadel- wald | Misch- wald | Grün- land | Acker- land |
|--|----------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Laser DHM 2000 | | | | | | | |
| σ [m] | 3,47 | 2,29 | 11,10 | 10,81 | 11,45 | 3,04 | 1,84 |
| mittl. Abweichung [m] | 1,08 | 0,36 | 9,57 | 4,26 | 7,22 | 0,71 | 0,32 |
| Genauigkeit (90%) [m] | 4,00 | 2,00 | 25,00 | 20,50 | 24,50 | 1,85 | 0,95 |
| SRTM X-Band DHM | | | | | | | |
| σ [m] | 4,32 | 4,42 | 8,69 | 7,85 | 7,79 | 6,08 | 3,68 |
| mittl. Abweichung [m] | 3,01 | 3,08 | 4,23 | 2,92 | 3,98 | 2,28 | 3,48 |
| Genauigkeit (90%) [m] | 7,87 | 7,45 | 13,01 | 10,25 | 11,42 | 7,45 | 6,90 |
| SRTM C-Band DHM | | | | | | | |
| σ [m] | 5,22 | 2,71 | 11,62 | 10,50 | 11,92 | 7,95 | 4,92 |
| mittl. Abweichung [m] | 0,38 | -0,69 | 3,78 | 1,25 | 4,17 | -2,50 | 0,04 |
| Genauigkeit (90%) [m] | 6,50 | 1,75 | 16,70 | 13,50 | 18,50 | 6,70 | 4,80 |

Laser DHM 2000

Für das aus dem Jahr 2000 stammende Geländemodell wurde die detaillierte Fehleranalyse, basierend auf den topographischen Informationen von ATKIS, durchgeführt. Die gewonnenen Ergebnisse (Tabelle 5.11) erlauben die vermutete Ursache für die schlechten Ergebnisse der Analyse des gesamten Geländemodells genauer darzulegen.

Wie angenommen, ist der Grund in der Vermischung der Boden- und Nichtbodenpunkte zu finden. Diese Gegebenheit bewirkt, daß das Laserhöhenmodell insgesamt niedriger ist als die Referenz. Liefert das Geländemodell für die Bereiche ohne signifikante Bedeckung wie Ackerland, Grünland und Verkehrsflächen sehr gute Ergebnisse, liegen die Werte für bewaldete Regionen weit unter den für die Luftfahrt benötigten Genauigkeiten.

An den Qualitätsparametern für die Kategorie Ackerland läßt sich klar erkennen, daß der Laserscanner sehr gute Ergebnisse in der Altimetrie liefern kann. Hier liegt die Genauigkeit (Konfidenzintervall 90%) bei 0,95 m und die mittlere Abweichung bei 0,32 m. Ähnlich gute Ergebnisse konnten für die Verkehrsflächen (Genauigkeit 90% = 2,00 m / mittlere Abweichung = 0,36 m) und das Grünland (Genauigkeit 90% = 1,85 m / mittlere Abweichung = 0,71 m) ermittelt werden.

Für die Klasse „Bebaute Flächen“ können die Ergebnisse nicht ganz die Anforderungen der Area 2 (TMA) erfüllen, liefern aber mit einer Genauigkeit (90%) von 4,00 m und einem mittleren Fehler von 1,08 m immer noch akzeptable Ergebnisse.

Keine Aussage über die Qualität der Vermessungsmethode läßt sich für die bewaldeten Gebiete machen. Hier macht sich die im Vorfeld durchgeführte Trennung zwischen Boden- und Nichtbodenpunkten klar bemerkbar. Diese Tatsache läßt sich in den Werten für die Genauigkeit (Konfidenzintervall 90%) festmachen, die zwischen 20,50 m (Nadelwald) und 25,00 m (Laubwald) liegen. Diese Abweichungen entsprechen den mittleren Werten, welche die Abweichung zwischen den Bodenpunkten und der Oberfläche des Waldes darstellen.

Durch die ermittelten Ergebnisse wird deutlich, daß mittels Laseraltimetrie gewonnene Höhendaten, insbesondere für Gebiete mit ausgeprägter Vegetation, einer sorgfältigen Qualitätssicherung bedürfen. Ob hier für Luftfahrtanwendungen der Ansatz nach einer Trennung von erster und letzter Reflektion ausreichend ist, soll später anhand der im Jahr 2004 durchgeführten LIDAR-Befliegung untersucht werden.

SRTM X-Band

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der vorangegangenen Laservermessung unterscheiden sich die ermittelten Qualitätsparameter der einzelnen Klassen nicht so deutlich. Betrachtet man beispielsweise die mittlere Abweichung, bewegt sich diese zwischen 2,27 m für die Kategorie „Grünland“ und 4,23 m für die Bereiche, die mit Laubwald bedeckt sind. Somit läßt sich feststellen, daß jede Oberflächenklasse tiefer als die Referenzwerte liegt. Vergleicht man hiermit die mittlere Abweichung von 3,13 m, die für das gesamte SRTM X-Band Höhenmodell ermittelt wurde, wird deutlich, daß das Radarsystem oberflächenunabhängiger arbeitet, aber aufgrund der Eigenschaft der Radarstrahlung zu einem Eindringen in die Oberfläche neigt.

An den ermittelten Werten der Genauigkeit (Konfidenzintervall 90%) läßt sich dennoch ein Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit feststellen. Beträgt dieser als geringster Wert für die Kategorie „Ackerland“ 6,90 m, ist der Maximalwert für die Klasse „Laubwald“ mit 13,01 m fast doppelt so hoch. Insgesamt muß festgestellt werden, daß die Genauigkeit der mit dem X-Band Radarsystem gewonnenen Höhenwerte wesentlich von der Dichte der aufgenommenen Oberfläche abhängt.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß die SRTM X-Band Daten unter keinen Bedingungen Höheninformationen liefern, die eine Eignung für Luftfahrtanwendungen im An- bzw. Abflugbereich (Area 2) eines Flughafens aufweisen. Inwieweit sich der Datensatz durch die durchgeführte Fehlerabschätzung an die Anforderungen der Luftfahrt anpassen läßt, soll später in dieser Arbeit untersucht werden.

SRTM C-Band

Vergleicht man die 90 m C-Band Daten mit denen des X-Band 30 m Modells, wird erneut durch die Betrachtung der mittleren Abweichung deutlich, daß, wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, durch die Interpolation der 30 m C-Band Basisdaten der zufällige Fehler deutlich vermindert wurde. Die mittlere Abweichung bewegt sich zwischen -2,50 m für die Kategorie „Grünland“ und 4,17 m für die Klasse „Mischwald“. Klassen mit einem negativen mittleren Fehler sind insgesamt höher als das Referenzgelände, positive mittlere Abweichung zeigen Gebiete an, die unter den Kontrollhöhen liegen.

Betrachtet man allerdings die errechneten Genauigkeiten (Konfidenzintervall 90%) für die einzelnen topographischen Kategorien, läßt sich erkennen, daß die C-Band Höhendaten im Vergleich zu den SRTM X-Band Geländeinformationen insbesondere für die bewaldeten Gebiete schlechtere Ergebnisse liefern. Für die Klasse „Laubwald“ beträgt die Genauigkeit (90%) des C-Bandes 16,70 m und liegt somit um 3,70 m über dem Wert des X-Bandes. Für die Klasse „Nadelwald“ wurde eine Genauigkeit (90%) von 13,50 m errechnet, die 3,30 m über dem Wert des kurzwelligeren X-Bandes liegt. Eine wesentlich größere Differenz konnte für die Klasse „Mischwald“ berechnet werden. Hier beträgt die Genauigkeit (90%) des C-Band Modells 18,50 m und liegt somit 7,00 m über den X-Band Höhendaten. Anhand dieser Ergebnisse lassen sich trotz der Mittelung des ursprünglichen 30 m Datensatzes die in Abschnitt 2.2.2.1 beschriebenen Eigenschaften des langwelligeren C-Band Radars erkennen. Dieses neigt im Gegensatz zu den kurzwelligen X-Band Mikrowellen dazu, tiefer in Oberflächen einzudringen. Diese Eigenschaft läßt sich an den ermittelten Werten für die Waldgebiete sehr gut nachvollziehen. Für alle anderen Gebiete liegt die Genauigkeit (90%) über der des X-Bandes. Hier scheint der Einfluß des Interpolierens den des Eindringverhaltens in dichtere Untergründe zu übersteigen.

Auch das betrachtete SRTM C-Band Modell liefert bis auf die Klasse „Verkehrsflächen“ (Genauigkeit (90%) = 1,75 m) nicht die Qualität, daß die Datensätze für die kritische An- und Abflugphase eines zivilen Flugzeuges genutzt werden könnten. Dieser Datensatz müßte ebenfalls einer korrigierenden Maßnahme unterzogen werden.

Laser Scanning HVBG 2004

Da aufgrund einer Vorprozessierung der Laserdaten aus dem Jahr 2000 nicht mehr eindeutig ermittelt werden konnte, wie sich der Lasersensor hinsichtlich der ersten und der letzten Reflektion verhält, soll anhand der im Jahr 2004 gewonnenen LIDAR-Rohdaten insbesondere dieser Einfluß untersucht werden. Dieser Teil der Analyse erfolgte auch hier für die beiden zusätzlichen Untersuchungsgebiete nördlich und südlich des für die obigen Untersuchungen betrachteten zentralen Bereiches. Als Referenzdatensatz, stand wiederum nur das Geländemodell (DGM5) des HVGB zur Verfügung, welches ausschließlich Höheninformationen hinsichtlich des „nackten Bodens“ beinhaltet. Somit gestaltet es sich auch in diesem Untersuchungsabschnitt schwierig, eine genaue Aussage treffen zu können, inwieweit die Datensätze als Abbild der Erdoberfläche samt seiner Bedeckung geeignet sind. Nichtsdestotrotz soll versucht werden, aus dem Vergleich der Höhendaten der ersten und der letzten Reflektion mit dem Referenzdatensatz eine Bewertung hinsichtlich einer Nutzbarkeit für Luftfahrtanwendungen abzuleiten. Die ermittelten Qualitätsparameter für die sieben definierten Kategorien können Tabelle 5.12 entnommen werden.

Betrachtet man schließlich die Ergebnisse der Analyse unter Berücksichtigung einzelner topographischer Einflußfaktoren, so lassen sich für die beiden Untersuchungsgebiete vergleichbare Fehlergrößen feststellen. Somit zeigt sich, daß der Sensor über vergleichbaren Oberflächen mit einer konstanten Genauigkeit arbeitet.

Da die Höhendaten des Untersuchungsgebietes mit einem DGM als Referenz verglichen wurden, zeigt sich, daß die Höhenmodelle - gleich ob erste oder letzte Reflektion - durchweg höher liegen als die Referenz. Diese Tatsache war zu erwarten, da das Licht des Lasers im Gegensatz zur Mikrowellenstrahlung des Radars nicht dazu neigt, in geschlossene Oberflächen einzudringen.

Betrachtet man nun die Ergebnisse, die durch den Vergleich des Referenz DGM mit dem Höhenmodell der letzten Reflektion gewonnen wurden, erkennt man, daß die Höhenwerte der letzten Reflektion sehr gute Ergebnisse hinsichtlich einer Abbildung der Bodenpunkte liefern. Die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% weist im besten Fall einen Wert von 0,11 m für die Klassen „Grün- bzw. Ackerland“ auf. Das schlechteste Ergebnis wird mit 0,61 m für die Klasse „Nadelwald“ im Untersuchungsgebiet 2 festgestellt, auch wenn die mittlere

Abweichung hier immerhin -16,62 m beträgt. Anhand dieses Resultates läßt sich gut aufzeigen, daß durch den Nadelwald, der auch in den vegetationsarmen Wintermonaten eine dichte Bedeckung aufweist, genügend Licht des Laserstrahls bis zum Boden durchdringt, um ausreichend Informationen über die Bodenbeschaffenheit zu liefern.

Tabelle 5.12: Laser DHM Analyse -Einfluß der Oberflächenbedeckung

| Geländemodell/ Qualitätsparameter | Bebaute Flächen | Verkehrs- flächen | Laub- wald | Nadel- wald | Misch- wald | Grün- land | Acker- land |
|--|----------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Gebiet 1 | | | | | | | |
| <i>Erste Reflektion</i> | | | | | | | |
| σ [m] | 5,75 | - | 10,73 | 8,36 | 9,78 | 5,77 | 3,12 |
| mittl. Abweichung [m] | -4,79 | - | -18,23 | -21,09 | -21,08 | -2,71 | -0,81 |
| Conf. Level 90% [m] | -0,25 | - | -0,90 | -7,10 | -4,10 | -0,13 | -0,11 |
| <i>Letzte Reflektion</i> | | | | | | | |
| σ [m] | 4,16 | - | 9,06 | 11,23 | 10,92 | 2,77 | 1,42 |
| mittl. Abweichung [m] | -3,22 | - | -6,37 | -11,69 | -9,45 | -1,03 | -0,34 |
| Conf. Level 90% [m] | -0,21 | - | -0,23 | -0,31 | -0,28 | -0,11 | -0,11 |
| Gebiet 2 | | | | | | | |
| <i>Erste Reflektion</i> | | | | | | | |
| σ [m] | 5,58 | - | 10,94 | 8,65 | 8,59 | 6,19 | 3,23 |
| mittl. Abweichung [m] | -4,52 | - | -21,13 | -22,65 | -23,24 | -2,90 | -0,90 |
| Conf. Level 90% [m] | -0,24 | - | -2,64 | -10,22 | -11,62 | -0,09 | -0,11 |
| <i>Letzte Reflektion</i> | | | | | | | |
| σ [m] | 3,77 | - | 9,45 | 11,85 | 12,09 | 3,33 | 1,77 |
| mittl. Abweichung [m] | -2,77 | - | -6,86 | -16,62 | -14,36 | -1,25 | -0,45 |
| Conf. Level 90% [m] | -0,18 | - | -0,28 | -0,61 | -0,50 | -0,11 | -0,11 |

Prüft man schließlich die Resultate, welche durch den Vergleich mit dem Höhenmodell der ersten Reflektion und der DGM-Referenz gewonnen wurden, zeigt sich, daß für Bereiche ohne signifikante Bedeckung die Ergebnisse hinsichtlich der Genauigkeit (90%) annähernd gleich gut sind wie für die Analyse der letzten Reflektion. Große Unterschiede zeigen sich hingegen in den bewaldeten Bereichen. Hier weist die mittlere Abweichung ein Spektrum von -18,23 m (Laubwald Gebiet 1) bis hin zu -23,24 m (Mischwald Gebiet 2) auf. Die Größe der mittleren Abweichung entspricht in etwa der Höhe der in diesem Bereich zu erwartenden Vegetation. Während für die Genauigkeit (90%) der Klasse „Laubwald“ -0,90 m (Gebiet 1) und -2,64 m (Gebiet 2) aufgrund der geringen Bedeckungsdichte in der laubfreien Zeit erreicht werden können, liegen die Resultate für die Kategorien „Misch- bzw. Nadelwald“ zwischen -4,10 m und -11,62 m. Hier zeigt sich, daß die zuerst reflektierten Strahlen wesentlich weiter oben zurückgeworfen werden.

Wie die Genauigkeit der ersten Reflektion hinsichtlich eines Oberflächenmodells aussieht, läßt sich an dieser Stelle leider nicht exakt ermitteln. Doch aus den gewonnen Resultaten kann man feststellen, daß der Laser im Gegensatz zu den Mikrowellen des Radars nicht in geschlossene Oberflächen einzudringen vermag. Somit ist diese Technologie in der Lage, sehr genau die Höhe des reflektierenden Gegenstandes wiederzugeben. Es kann davon ausgegangen werden, daß eine LIDAR-Befliegung, die in den Perioden mit starker Vegetation und Belaubung durchgeführt wird, hinsichtlich einer Auswertung der ersten Reflektion gute Informationen zur Erstellung eines Oberflächenmodells bereitstellt.

Im Gegensatz zu den Analysen der mittels Radar gewonnenen Höhendaten scheint es für die Höhendaten des Lasersensors nicht sinnvoll zu sein, eine Modifikation der Daten, basierend auf einem in Abschnitt 4.2 beschriebenen „Safety Buffers“, vorzunehmen. Wie die

durchgeführte Untersuchung gezeigt hat, sollte man vielmehr eine Filterung der Werte bei der Prozessierung des Höhenmodells vornehmen, um Strahlen, die dennoch ihren Weg durch eine Lücke in der Oberfläche gefunden haben, zu eliminieren. Solche Korrekturverfahren, sowohl hinsichtlich der Bodenpunkte der letzten Reflektion wie auch der Oberflächendarstellung der ersten Reflektion, können beispielsweise durch die Anwendung einer Min- bzw. Max-Filterung erreicht werden. Somit kann durch die Prozessierung eines Laser Höhendatensatzes unter Verwendung eines angepaßten Filters sogar unter Vergrößerung des Stützstellenabstandes eine Zunahme der Genauigkeit erreicht werden, da eine Glättung der ungewollten Ausreißer erzielt werden kann.

Unter Rücksichtnahme der hier beschriebenen Faktoren bietet die Laserscanning-Technologie zweifelsohne die Kapazität, die geforderten Genauigkeiten der RTCA an Area 2 und sogar Area 3 zu erfüllen. Allerdings muß an dieser Stelle erneut darauf hingewiesen werden, daß die LIDAR-Technologie äußerst kostenintensiv ist und sich somit nur für begrenzte Gebiete anbietet. Über dies hinaus setzt das Operieren aus der Luft dem System sowohl geographische wie auch politische Grenzen.

5.2.4 Analyse des Einflusses der Geländeneigung (-rauhigkeit)

Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben und wie auch die bereits gewonnen Ergebnisse erkennen lassen, spielt die Geländeneigung bei der Generierung von Höheninformationen eine deutliche Rolle. Um die Größe dieses Einflußfaktors quantifizieren zu können, soll hierzu das Untersuchungsgebiet bei Pfronten/Ostallgäu eingehend betrachtet werden. Aufgrund der alpinen Ausprägung dieses Untersuchungsgebietes können Geländeabschnitte mit Steigungen bis zu 90 Grad vorgefunden werden.

Solch charakteristische Steigungen werden im Untersuchungsgebiet bei Michelstadt nicht angetroffen, dennoch wird auch für diese Region eine entsprechende Analyse durchgeführt, um die Ergebnisse für Bereiche geringerer Steigung verifizieren zu können.

Ebenfalls gilt es in diesem Abschnitt zu untersuchen, ab welchem Neigungsgrad der Einfluß der Steigungsrate den der Oberflächenbedeckung übersteigt.

5.2.4.1 Kategorisierung der Neigungsklassen

Die Einteilung der Neigungsklassen erfolgte jeweils in 10° Schritten. Für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt konnten insgesamt nur 4 Klassen bestimmt werden, da Geländeabschnitte mit Steigungen größer als 40° nicht in einer derartigen Ausdehnung vorgefunden wurden, so daß eine sinnvolle Analyse durchgeführt werden konnte.

Für das Untersuchungsgebiet bei Pfronten wurden acht Steigungsklassen ermittelt. Geländeabschnitte mit einer Steigung bis zu 70° sind in der hier betrachteten alpinen Region mit einer derartigen räumlichen Ausdehnung vorzufinden, daß eine Kategorisierung in 10° Schritten sinnvoll ist. Gebiete, die eine Steigung größer als 70° aufweisen, sind hingegen nur noch in einem geringeren Maße anzutreffen. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle keine Unterteilung in 10° Schritten, sondern Steigungen, größer 70°, werden in einer Klasse zusammengefaßt.

5.2.4.2 Verifizierung der Höhenmodelle

Wie in Abschnitt 4.6.1 dargestellt, wurde auf der Basis der DGM5 Höhendaten eine Neigungskartierung erstellt, aus der die einzelnen Klassen ermittelt wurden. Analog zu den vorangegangenen Untersuchungen wurde aus dem Differenzgeländemodell für jede Klasse das entsprechende Gebiet aus dem Gesamtdatensatz herausgetrennt und die Qualitätsparameter wie die Standardabweichung bei einem Sigma, die mittlere Abweichung sowie die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall bei 90% bestimmt. Die ermittelten Ergebnisse des Einflusses der Geländeneigung können Tabelle 5.13 entnommen werden.

Tabelle 5.13: SRTM DHM Analyse unter Berücksichtigung der Geländeneigung

| Geländemodell/ Qualitätsparameter | 0-10° | 10-20° | 20-30° | 30-40° | 40-50° | 50-60° | 60-70° | >70° |
|--|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| SRTM X-Band Pfronten | | | | | | | | |
| mittl. Abweich. [m] | -2,74 | -6,75 | -7,81 | -10,97 | -12,88 | -14,91 | -21,89 | -44,18 |
| σ [m] | 7,54 | 15,08 | 22,48 | 27,60 | 28,83 | 36,17 | 47,43 | 70,54 |
| Conf. Level 90% [m] | 2,25 | 3,00 | 8,75 | 10,80 | 12,50 | 18,00 | 26,00 | 29,00 |
| SRTM C-Band Pfronten | | | | | | | | |
| mittl. Abweich. [m] | -2,93 | -6,39 | -5,85 | -6,75 | -7,95 | -9,19 | -12,10 | -12,39 |
| σ [m] | 6,99 | 13,62 | 17,78 | 20,53 | 23,23 | 28,76 | 37,60 | 42,25 |
| Conf. Level 90% [m] | 1,60 | 3,00 | 10,80 | 12,40 | 13,80 | 19,70 | 22,80 | 31,17 |
| SRTM X-Band Michelstadt/Odenwald | | | | | | | | |
| mittl. Abweich. [m] | 3,29 | 2,94 | 3,89 | 4,59 | - | - | - | - |
| σ [m] | 6,10 | 7,45 | 7,93 | 6,13 | - | - | - | - |
| Conf. Level 90% [m] | 9,30 | 10,00 | 11,30 | 11,00 | - | - | - | - |
| SRTM C-Band Michelstadt/Odenwald | | | | | | | | |
| mittl. Abweich. [m] | 0,83 | 0,42 | 2,73 | 11,51 | - | - | - | - |
| σ [m] | 7,99 | 11,37 | 15,38 | 14,27 | - | - | - | - |
| Conf. Level 90% [m] | 9,95 | 15,00 | 23,50 | 28,50 | - | - | - | - |

Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald

Betrachtet man die Ergebnisse des Einflusses der Geländeneigung für das SRTM X-Band Höhenmodell mit 30 m Stützstellenabstand, erkennt man, daß unabhängig von der Steigungsklasse die Werte der Qualitätsparameter weitgehend identisch sind und denen der Untersuchung des gesamten Differenzmodells (Tabelle 5.7) im wesentlichen entsprechen. Aufgrund der Resultate läßt sich an dieser Stelle feststellen, daß für Geländeabschnitte mit mäßiger Steigung und ausgeprägter Bodenbedeckung (Bewaldung), der Einfluß der Geländeneigung auf die Genauigkeit eines X-Band Höhenmodells gegenüber dem Einfluß der Bedeckung eine untergeordnete Rolle spielt.

Für die SRTM C-Band Daten stellt sich das Ergebnis allerdings etwas anders dar. Hier ist mit steigendem Neigungsgrad eine Verschlechterung der Qualitätsparameter zu erkennen. Lediglich für die mittlere Abweichung ist eine Verbesserung des Wertes um 0,41 m von der Klasse 0-10° zur Klasse 10-20° festzustellen. Auch für die Standardabweichung bei einem Sigma ist zwischen der Klasse 20-30° und 30-40° eine geringe Verbesserung des Wertes um 1,11 m festzustellen.

Daß im Gegensatz zu dem SRTM X-Band Höhenmodell bei dem 90 m C-Band Datenmodell mit Zunahme der Geländeneigung eine Abnahme der Qualität der Höheninformationen festzustellen ist, kann darauf zurückgeführt werden, daß zum einem durch die Erstellungsmethode des 90 m Höhenmodells eine „Glättung“ des Fehlers stattgefunden hat. Andererseits dringt das langwelligere C-Band Radar tiefer in Oberflächen ein, wodurch der Einfluß der Vegetation nicht so deutlich festgestellt werden kann.

Ob sich diese Ergebnisse für den Bereich Pfronten bestätigen lassen, soll im Folgenden gezeigt werden.

Untersuchungsgebiet Pfronten/Ostallgäu

Da das alpine Untersuchungsgebiet eine deutlich geringere Bodenbedeckung, insbesondere in den höher gelegenen Regionen, aufweist als die Region bei Michelstadt, kann hier deutlicher der reine Einfluß der Geländesteigung aufgezeigt werden.

War im Gebiet bei Michelstadt für den X-Band Sensor bei Steigungen bis 40° aufgrund der ausgeprägten Bewaldung keine aussagekräftige Änderung der Qualitätsparameter

festzustellen, kann für das alpine Untersuchungsgebiet mit zunehmender Geländesteigung eine Verschlechterung der Qualität des Datensatzes erkannt werden. Weist die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall 90% für die Kategorie 0-10° den sehr guten Wert von 2,25 m auf, so beträgt für die Gebietsabschnitte mit einer Steigung von >70° dieser Wert 29,00 m. Auch die Standardabweichung steigt um etwa den Faktor zehn von der niedrigsten Steigungskategorie (0-10°) mit 7,54 m auf 70,54 m für die Kategorie >70°.

Die mittlere Abweichung des X-Band Höhenmodells steigt kontinuierlich von minus 2,74 m auf minus 44,18 m an. Das negative Vorzeichen der mittleren Abweichung weist darauf hin, daß das betrachtete Höhenmodell gegenüber den Referenzdaten insgesamt zu hoch ist, was sich auf den Einsatz in der Luftfahrt unkritisch auswirken sollte.

Für das 90 m C-Band Höhenmodell konnte für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt im Gegensatz zu den X-Band Daten mit zunehmender Geländeneigung eine Verschlechterung der Qualität des Datenmaterials festgestellt werden. Vergleicht man jedoch die ermittelten Qualitätsparameter mit jenen des alpinen Untersuchungsgebietes, welches eine wesentlich dünnere Bodenbedeckung aufweist, wird deutlich, daß sich die Werte etwas unterscheiden, obwohl auch hier mit zunehmender Geländesteigung ein Qualitätsverlust einhergeht.

War die mittlere Abweichung in der Region bei Michelstadt positiv, also der C-Band Datensatz niedriger als die Referenz, so zeigt nun wie bei den X-Band Daten die mittlere Abweichung negative Werte, was darauf hinweist, daß auch hier der Datensatz insgesamt höher ist als die Bezugswerte.

Für die Standardabweichung bei einem Sigma ist auch hier ein Anstieg mit zunehmender Geländesteigung feststellbar. Zwar sind geringe Differenzen der Ergebnisse zwischen den beiden Untersuchungsgebieten zu erkennen, doch in einer Größenordnung, daß sich hier kein eindeutiger Bezug zu den Untersuchungsgebieten feststellen läßt.

Betrachtet man nun die ermittelten Werte für die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall 90% sieht man, daß die Werte für die Region Pfronten deutlich unter denen von Michelstadt liegen. Beträgt die Genauigkeit (90%) für die Steigungsklasse 0-10° in Michelstadt 9,95 m, so liegt diese für das Untersuchungsgebiet Pfronten bei nur 1,60 m. Für die Kategorie 30-40° stehen 25,50 m in Michelstadt, 12,40 m in Pfronten gegenüber. Auch hier scheint die Vegetation sowie die Prozessierung der Daten einen derartigen Einfluß auf die Ergebnisse auszuüben, so daß sich der Einfluß der Geländeneigung im Untersuchungsgebiet Michelstadt nicht einwandfrei nachweisen läßt.

Vergleicht man nun die Ergebnisse für den X-Band und C-Band Sensor miteinander, läßt sich erkennen, daß für das 30 m Modell des kurzwelligen X-Band Sensor in Bereichen großer Neigung (> 30°) eine deutlich größere mittlere Abweichung feststellen läßt als für das 90 m C-Band Modell. Für die Steigungsklasse >70° beträgt der Unterschied für diesen Qualitätsparameter zwischen den verschiedenen Höhenmodellen sogar 31,79 m. Auch für die Standardabweichung bei einem Sigma kann ein ähnlicher Zustand festgestellt werden. Hier beträgt die Differenz zwischen den beiden Sensortypen bei Steigungen >70° 28,29 m. Daß das 90 m Datenmodell des C-Band Sensors im Vergleich mit dem 30 m Modell des X-Band Sensors hinsichtlich dieser Qualitätsparameter deutlich bessere Ergebnisse liefert, kann auch hier auf die Tatsache zurückgeführt werden, daß die C-Band Daten über eine Mittelung der Höhenwerte des ursprünglichen 30 m Höhenmodells erstellt wurden. Dadurch konnte der Fehler geglättet und der Einfluß stark abweichender Werte eliminiert werden.

Anders stellt sich das Ergebnis für die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% dar. Für diesen, für die Luftfahrt aussagekräftigen Qualitätsparameter, liefert der X-Band Datensatz weitgehend identische Ergebnisse zum C-Band Höhenmodell. Der maximale Unterschied zwischen den Sensortypen beträgt 3,20 m in der Steigungsklasse 60-70°.

Vergleicht man nun die ermittelten Werte für die Genauigkeit (90%) mit den Anforderungen der RTCA für Area 2, wird deutlich, daß nur für Geländeabschnitte mit Steigungen bis zu 20°

die Anforderungen erfüllt werden können. Schon ab der Steigungsklasse 20-30° können die Vorgaben nicht mehr eindeutig eingehalten werden.

Die betrachteten Datensätze wären aufgrund der ermittelten Ergebnisse nicht geeignet, An- bzw. Abflüge auf Flughäfen in alpinem Gelände zu unterstützen. Aus diesem Grund soll an späterer Stelle untersucht werden, inwieweit aufgrund der gewonnenen Ergebnisse eine Manipulation der Datensätze vorgenommen werden kann, damit diese einen sicheren Betrieb eines Flugzeuges zulassen.

5.2.5 Analyse des Einflusses der Reflektionsintensität

An dieser Stelle soll untersucht werden, ob ein Zusammenhang zwischen dem ermittelten Fehler des Höhenmodells und der Stärke des Radarechos bzw. der Reflektionsintensität des Laserpulses festgestellt werden kann. Hierzu werden das SRTM X-Band Höhenmodell und das Laser Höhenmodell der ersten Reflektion aus der LIDAR-Befliegung im Jahr 2004 analysiert. Die Untersuchung wird für das Gebiet bei Michelstadt im Odenwald durchgeführt. Die Vorgehensweise wie auch die Ergebnisse der Analyse werden nachfolgend beschrieben

5.2.5.1 Einfluß des Radarechos des SAR-X Sensors

In diesem Abschnitt wird betrachtet, inwieweit das Radarecho in direktem Zusammenhang mit der Qualität eines Höhenmodells steht. Die Untersuchung soll dabei exemplarisch für die Daten des SRTM X-Band Sensors im Untersuchungsgebiet bei Michelstadt/Odenwald durchführt werden. Hierzu wird wie in Abschnitt 4.6.3 beschrieben, das aus der SRTM-Mission gewonnene Geocoded Terrain Corrected (GTC) Radarbild des DLR mit den dazugehörigen Fehlern der Höheninformationen abgeglichen.

Tabelle 5.14: Qualitätsparameter in Abhängigkeit des Radarechos

| Pixel Wert [-] | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 0-5.000 | 4,89 | 6,87 | 13,00 |
| 5.000-10.000 | 5,07 | 6,69 | 13,00 |
| 10.000-15.000 | 3,55 | 10,32 | 12,50 |
| 15.000-20.000 | 2,37 | 9,93 | 12,00 |
| 20.000-25.000 | 2,00 | 7,82 | 10,00 |
| 25.000-30.000 | 1,96 | 7,00 | 8,50 |
| 30.000-35.000 | 2,40 | 6,56 | 8,50 |
| 35.000-40.000 | 2,71 | 6,37 | 9,00 |
| 40.000-45.000 | 3,14 | 6,43 | 9,50 |
| 45.000-50.000 | 3,45 | 6,62 | 10,00 |
| 50.000-55.000 | 3,76 | 6,76 | 11,00 |
| 55.000-60.000 | 4,10 | 6,96 | 11,50 |
| 60.000-65.000 | 4,38 | 6,91 | 12,00 |
| 65.000-70.000 | 4,76 | 7,17 | 12,50 |

Hierzu wurde in einem ersten Arbeitsschritt analog zur Einteilung der Steigungsklassen der Datensatz in einzelne Kategorien unterteilt. Die Intensität des vorliegenden GTC Radarbild weist ein Spektrum von 1 - 65.282 Pixelwerten auf. Um den Rechenaufwand zur Kategorisierung der Datensätze gering zu halten, aber dennoch möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erlangen, wurde das GTC Radarbild in insgesamt 14 Klassen unterteilt. Jede Klasse repräsentiert ein Spektrum von 5.000 Pixelwerten. Basierend auf dieser Unterteilung wurde wie in den vorangegangenen Untersuchungen das aus den Referenzdaten sowie dem X-Band Geländemodell berechnete Differenzhöhenmodell zerlegt und die Qualitätsparameter

für jede einzelne Klasse bestimmt. Die Ergebnisse dieser Datenverifikation sind Tabelle 5.14 zu entnehmen.

Betrachtet man die errechneten Qualitätsparameter in Abhängigkeit von den Pixelwerten des Radarechos, läßt sich feststellen, daß insbesondere für die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% und der mittleren Abweichung eine Abhängigkeit zwischen Echostärke und Qualität erkannt werden kann.

Während in der Klasse, welche die niedrigsten Echowerte (0-5.000) wiedergibt, die Genauigkeit (90%) 13,00 m und die mittlere Abweichung 4,89 m betragen, kann bei einer Zunahme der Echointensität eine Verbesserung der Qualitätsparameter festgestellt werden. In den Bereichen der mittleren Intensitäten (20.000-30.000) beträgt die Genauigkeit (90%) 8,5 m und der Mittelwert der Abweichung 1,96 m. Dies bedeutet, daß sich die Genauigkeit (90%) um 4,50 m und die mittlere Abweichung um 2,93 m im Gegensatz zur niedrigsten Klasse verbessert haben.

Allerdings ist ab diesem Punkt bei einer Zunahme der Echointensitäten wiederum eine Abnahme der Qualität des Datensatzes festzustellen. Von der Intensitätsklasse mit der größten Genauigkeit (25.000-30.000) bis hin zur Klasse mit den höchsten Radarechowerten (65.000-70.000) kann wiederum eine Verschlechterung der Genauigkeit (90%) um 4,00 m, bei der mittleren Abweichung um 2,80 m festgestellt werden. Lediglich der Wert für die Standardabweichung bei einem Sigma bleibt von der Kategorisierung der Radarintensitäten unberührt.

Nach der durchgeführten Analyse scheint für das betrachtete Untersuchungsgebiet bei Michelstadt ein Zusammenhang zwischen der Intensität des rückgestrahlten Radarechos und der Qualität des dazugehörigen Geländemodells zu bestehen.

Tabelle 5.15: Radarechointensitäten in verschiedenen Oberflächentypen

| Oberflächentyp | mittl. Intensität [-] | σ [-] |
|------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Gesamtes Untersuchungsgebiet | 38.974 | 14.896 |
| Bebaute Flächen | 39.284 | 17.777 |
| Laubwald | 41.389 | 18.279 |
| Nadelwald | 41.630 | 13.515 |
| Mischwald | 40.301 | 16.526 |
| Grünland | 34.708 | 12.596 |
| Ackerland | 37.642 | 12.104 |

Da die ermittelten Werte für die Genauigkeit (90%) und die mittlere Abweichung in ihrer Größe in etwa jenen der Analyse der topographischen Gegebenheiten entsprechen, soll in einem nächsten Schritt ermittelt werden, ob einem bestimmten Oberflächentyp ein bestimmtes Spektrum an Radarechointensitätswerten zugeordnet werden kann. Aus diesem Grund wurde das GTC Radarbild hinsichtlich der im Untersuchungsgebiet Michelstadt dominierenden Oberflächentypen unterteilt und für jede topographische Klasse die mittlere Intensität und die Standardabweichung der dort auftretenden Pixelwerte ermittelt. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 5.15: wiedergegeben.

Betrachtet man die mittleren der Intensitäten für die einzelnen Oberflächentypen, so läßt sich insbesondere für die bewaldeten Bereiche zwar eine Abweichung zwischen den einzelnen Kategorien feststellen, doch sind die Unterschiede im Vergleich zu dem errechneten Mittelwert des Gesamtgebietes eher gering. Vor diesem Hintergrund lassen sich folglich über die Intensitätswerte des Radarechos keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Oberflächenbedeckung machen.

Inwieweit sich anhand der ermittelten Fehlergrößen für die jeweiligen Reflektionskategorien eine Anpassung der Datensätze an die von der RTCA/EUROCAE und ICAO geforderten Genauigkeiten machen lassen, soll später in dieser Arbeit untersucht werden.

5.2.5.2 Einfluß der Reflektionsintensität von LIDAR

Analog zur Analyse des Einflusses des Radarechos soll an dieser Stelle untersucht werden, inwieweit ein Zusammenhang zwischen der Reflektionsintensität des Laserstrahls und der Genauigkeit des dazugehörigen Höhenmodells hergestellt werden kann.

Die Untersuchung erfolgte für den nördlich des zentralen Untersuchungsgebietes liegenden Geländeabschnitt, für den lediglich das DGM5 des HVBG als Referenzdatensatz zur Verfügung stand. Somit war es nicht möglich, die Untersuchung hinsichtlich eines digitalen Oberflächenmodells (DOM) durchzuführen. Die Analyse wurde somit bezüglich eines digitalen Geländemodells (DGM) vorgenommen. Um störende Einflüsse signifikanter Bodenbedeckung zu vermeiden, wurden die bewaldeten Bereiche mit Hilfe der ATKIS Klassen (siehe Abschnitt 4.6.2) aus dem zu analysierenden Differenzmodell entfernt. Eine Darstellung des reduzierten Datensatzes ist Abbildung 5.11 zu entnehmen.

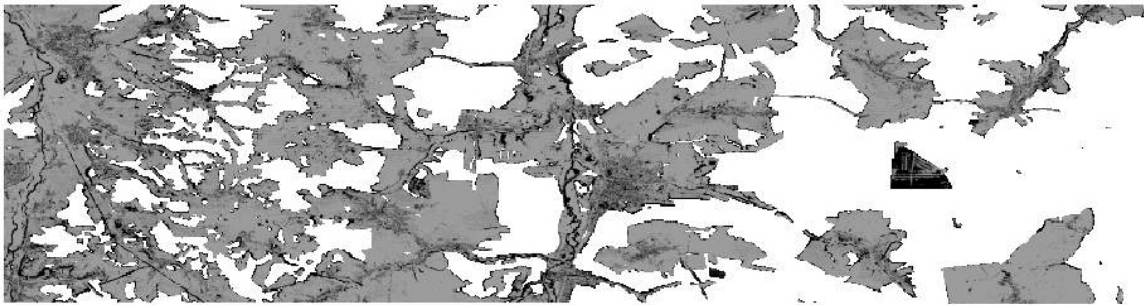


Abbildung 5.11: Differenzhöhenmodell ohne bewaldete Gebiete

Zur Bewertung des Einflusses der Intensitätsstärke wurde schließlich das Intensitätsbild der ersten Reflektion kategorisiert. Das vorgefundene Intensitätsbild weist eine Spanne von 0 bis 992 Pixelwerten auf. Basierend auf diesen Werten wurden schließlich zehn Intensitätsklassen definiert. Jede Klasse umfaßt einen Bereich von 50 Pixelwerten. Allerdings wurden aufgrund der geringen Häufigkeit von Intensitätswerten größer als 450 jene Werte in einer Klasse zusammengefaßt.

Schließlich wurden die definierten Klassen aus dem Reflektionsdatensatz extrahiert und wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben, die entsprechenden Abschnitte des 2D-Differenzgeländemodells hinsichtlich ihrer Qualitätsparameter untersucht. Die Ergebnisse der Qualitätsanalyse sind Tabelle 5.16 zu entnehmen.

Das ermittelte Resultat zeigt einen ähnlichen Verlauf wie jenes der Betrachtung des Radarechos bei den SRTM X-Band Daten (vgl. Tabelle 5.14).

Während für die niedrigste Intensitätskategorie mit einer mittleren Abweichung von -6,78 m, einer Standardabweichung bei einem Sigma von 7,88 m und einer Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall 90% von -0,29 m eher schlechte Ergebnisse ermittelt werden konnten, so steigt mit einer Zunahme der betrachteten Reflektionsstärke die Qualität des Höhenmodells. Dieser Effekt ist bis zum Erreichen der Pixelwertklasse 250-300 zu beobachten. Hier kann schließlich eine mittlere Abweichung -1,47 m, eine Standardabweichung von 3,96 m und eine Genauigkeit (90%) von -0,16 m festgestellt werden. Ab dieser Klasse nimmt die Qualität der betrachteten Höhenwerte schwach aber kontinuierlich ab, bis für die Klasse 450-992 schließlich eine mittlere Abweichung von -2,23 m, eine Standardabweichung von 5,32 m und eine Genauigkeit (90%) von -0,16 m erreicht werden. Eine Abweichung von dem hier beschriebenen Fehlerverlauf ist für die Kategorie 200-250 festzustellen. Doch sei an dieser

Stelle angemerkt, daß diese Gruppe nur durch eine geringe Anzahl an Höhenwerten repräsentiert wurde, so daß die hier gewonnenen Ergebnisse nicht dieselbe Aussagefähigkeit aufweisen wie für die restlichen Kategorien.

Die Schwankung der Qualität bei der Betrachtung der Intensitätsstärken kann für die LIDAR-Daten besonderes an der mittleren Abweichung wie auch der Standardabweichung festgemacht werden. Sieht man einmal von der niedrigsten Intensitätsklasse (0-50) sowie der Klasse mit einer geringen Anzahl an Vergleichswerten (200-250) ab, weist die Genauigkeit (90%) mit Werten zwischen -0,15 m und -0,17 m praktisch dasselbe Ergebnis auf.

Somit läßt sich feststellen, daß für den hier untersuchten Datensatz aufgrund der Intensitäten durchaus ein Rückschluß auf die Qualität der Daten vorgenommen werden kann. Allerdings kann eine auffällige Schwankung nur für den mittleren Fehler sowie die Standardabweichung nachgewiesen werden. Für den Parameter, auf dessen Basis eine Modifikation der Höhendaten für die Nutzung in der Luftfahrt stattfinden würde, der Genauigkeit (90%), kann keine signifikante Veränderung ermittelt werden. Diese Tatsache hat, wie bei den obigen Analysen der Laserhöhenmodelle gezeigt wurde, keine nachteilige Auswirkung auf die Nutzbarkeit der Daten für Luftfahrtanwendungen. LIDAR-Höhenmodelle können eher über eine Filterung der Datensätze modifiziert werden als über die Addition einer Sicherheitsmarge.

Tabelle 5.16: Qualitätsparameter in Abhängigkeit der Laser-Reflektionsintensitäten

| Intensität [-] | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 0-50 | -6,78 | 7,88 | -0,29 |
| 50-100 | -2,91 | 5,74 | -0,17 |
| 100-150 | -1,98 | 4,61 | -0,16 |
| 150-200 | -1,64 | 4,15 | -0,15 |
| 200-250 | -4,71 | 6,30 | -0,27 |
| 250-300 | -1,47 | 3,96 | -0,16 |
| 300-350 | -1,73 | 4,41 | -0,16 |
| 350-400 | -1,82 | 4,64 | -0,16 |
| 400-450 | -2,05 | 5,09 | -0,16 |
| 450-992 | -2,23 | 5,32 | -0,16 |

Zusammenfassend läßt sich für die auf der Basis der Lasertechnologie gewonnenen Höheninformationen feststellen, daß die geforderten Genauigkeiten für alle in [RTC05a] und [ICA04] beschriebenen „Areas“ prinzipiell gewährleistet werden können. Allerdings gilt es hierbei erneut zu berücksichtigen, daß den Verfahren der flugzeuggetragenen LIDAR-Technik Schranken gesetzt sind. Flugzeuggetragene Lasersysteme bedingen zum einem sehr hohe Produktionskosten, zum anderen sind diesem Verfahren gegenüber den aus dem Weltall operierenden Systemen auch räumliche Grenzen gesetzt. Ein weiterer Faktor, der die Anwendbarkeit von LIDAR Höhenmodellen begrenzt, ist das Datenvolumen, welches mit der Bereitstellung des vollständigen Informationsgehaltes einhergeht. Um die Datenmenge auf ein Niveau zu bringen, damit sie heutzutage üblichen Avioniksystemen gerecht wird, müssen die Ausgangsdaten so dezimiert werden, daß der benötigte Informationsgehalt bestehen bleibt, aber das Datenvolumen dennoch signifikant reduziert wird. Wie in der vorliegenden Arbeit gezeigt werden konnte, liegt die Problematik bei der Nutzung von LIDAR-Höheninformationen in der Luftfahrt nicht an der Qualität der Sensorik, sondern vielmehr an der Algorithmik der Prozessierung der Daten, um letztendlich den definierten Anforderungen gerecht zu werden. Beispielhaft können hier nochmals die von [RTC05a] und [ICA04] genannten Anforderungen an digitale Geländedaten für den Nutzungsbereich „Area 2“ herangezogen werden. Hier wird, wie bereits mehrfach beschrieben, eine Genauigkeit von 3 m bei

einem Konfidenzintervall von 90% gefordert. Wie gezeigt ist diese Genauigkeit durch die Lasertechnologie problemlos leistbar, allerdings soll diese Anforderung durch einen Datensatz wiedergegeben werden, der einen Stützstellenanstand von 30 m aufweist. Die in dieser Arbeit ermittelten Genauigkeiten wurden jedoch an Höhenmodellen bestimmt, die einen Stützstellenabstand von 5 m bzw. 10 m besitzen. Soll der Informationsgehalt von diesen Geländemodellen mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung auf einen Datensatz mit einer wesentlich geringeren Granularität übertragen werden, wird deutlich, welche Anforderungen an die Prozessierung der Daten gestellt werden muß, damit der gewünschte Informationsgehalt konserviert werden kann.

Basierend auf den hier genannten Erkenntnissen soll demnach nachfolgend nur für die SRTM Höhenmodelle gezeigt werden, inwieweit die sicherheitskritischen Ungenauigkeiten, die bei der Nutzung von weltraumgetragenen Radarsystemen auftreten, eliminiert werden können, damit die entsprechenden Datenprodukte für eine erweiterte Nutzung in der Luftfahrt zur Verfügung stehen.

5.3 Definition und Addition eines „Safety Buffers“

Wie bei der Verifizierung der Geländemodelle in Abschnitt 5.2 gezeigt wurde, konnten die mittels SRTM Radarsensoren gewonnenen Höhendaten unabhängig von der verwendeten Wellenlänge der Mikrowellen nicht die angestrebten Genauigkeiten aufweisen. Die Daten sind somit für Luftfahrtanwendungen, die Informationen über den An- bzw. Abflugbereich um einen Flughafen herum bereithalten sollen, nicht geeignet.

Deshalb soll wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, auf Basis der gewonnenen Ergebnisse der Analysen des Einflusses der Oberflächenstruktur, der Geländerauhigkeit wie auch der Reflektionsintensität versucht werden, die Datensätze so zu modifizieren, daß sie schließlich den in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Einsatzgebieten gerecht werden.

Das ausgewählte Szenario zur Verifikation des Verfahrens stellt die Anpassung der Daten hinsichtlich ihrer Nutzung in einer Flugphase dar, in der sich das Flugzeug dem Boden annähert, eine Berührung aber auf jeden Fall vermieden werden soll. Solch eine Flugphase wird in [RTC05a] und [ICA04] durch Area 2 beschrieben, für die eine vertikale Genauigkeit von 3 m bei einem Konfidenzintervall von 90% gefordert wird. Da diese Anforderung nicht von den SRTM X- und C-Band Radardaten erfüllt werden konnte, soll durch die Addition einer Sicherheitsmarge in Form eines „Safety Buffers“ versucht werden, die Datensätze so zu manipulieren, daß ihre Nutzung eine weitgehend unkritische Anwendung in der Luftfahrt zuläßt.

Die Modifikation des Datenmaterials soll auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Zunächst soll auf die Geländedaten ein pauschaler Puffer addiert werden, der auf den in Abschnitt 5.2.2 ermittelten Qualitätsparametern, der Betrachtung des Gesamtgebietes beruht. In einem zweiten Schritt erfolgt eine Bearbeitung der Höheninformationen beruhend auf den in Abschnitt 5.2.3 bis 5.2.5 gewonnenen Erkenntnissen über die Genauigkeiten der Geländemodelle unter verschiedenen Randbedingungen.

Die Größe des „Safety Buffers“ ergibt sich aus den Werten, die für die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% bestimmt wurden. Beträgt dieses für ein Geländemodell bzw. für eine ausgewählte Kategorie beispielsweise 10 m, so wird dieser Wert auf die in diesem Abschnitt betrachteten Höhenwerte als eine Art Sicherheitsmarge aufaddiert. Sollten die berechneten Ergebnisse der Genauigkeit (90%) keine ganze Zahl darstellen, so wird der Wert auf den nächst größeren ganzen Wert gerundet. Die gewonnen Ergebnisse für die mittlere Abweichung sowie die Standardabweichung werden hier nicht berücksichtigt. Diese geben zwar einen Einblick in die Verteilung des Fehlers, beinhalten aber keine Informationen, die ein Erreichen der durch [RTC05a] und [ICA04] geforderten Genauigkeiten (Konfidenzintervall 90%) ermöglichen.

Nach der Modifikation des Geländedatensatzes durch einen entsprechenden „Safety Buffer“ werden die Geländemodelle, sofern eine partielle Pufferung vorgenommen wurde, nach der Zusammenfügung des zerteilten Datensatzes erneut einem Verifikationsprozeß unterzogen. Hierbei wird der abgewandelte Datensatz, wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben, mit dem Referenzgeländemodell verglichen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden nachfolgend für die einzelnen Pufferungsmethoden detailliert dargestellt.

5.3.1 Addition eines pauschalen Puffers

Im ersten Verifizierungsschritt soll untersucht werden, inwieweit die vorliegenden Geländemodelle unter Berücksichtigung der in Tabelle 5.17 dargestellten Genauigkeiten (90%) modifiziert werden können, daß sie den Anforderungen der „Area 2“ genügen. Diese Methodik ist einfach umsetzbar, da auf jeden Höhenwert der aus der Genauigkeit (90%) abgeleitete pauschale Puffer aufaddiert wird. Eine detaillierte Betrachtung der Daten ist hierzu nicht notwendig.

Tabelle 5.17: Übersicht der Qualitätsparameter der Radar Höhenmodelle

| Geländemodell | σ [m] | mittl. Abweichung [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <i>Michelstadt/Odenwald</i> | | | |
| X-Band DHM / Michelstadt | 6,54 | 3,13 | 9,70 |
| C-Band DHM / Michelstadt | 9,18 | 0,80 | 11,50 |
| <i>Pfronten/Ostallgäu</i> | | | |
| X-Band DHM gesamt | 21,36 | -7,60 | 5,50 |
| X-Band DHM >1500m | 32,33 | -8,53 | 12,00 |
| C-Band DHM gesamt | 16,83 | -5,67 | 6,30 |
| C-Band DHM >1500m | 19,10 | -2,23 | 14,50 |

Neben den ermittelten Genauigkeiten (90%) sind in Tabelle 5.17 nochmals die errechnete Standardabweichung bei einem Sigma wie auch die mittlere Abweichung der ursprünglichen Geländemodelle zusammengefaßt dargestellt, um die Werte mit den Ergebnissen der Verifikation der modifizierten Höhendaten vergleichen zu können. Die Resultate der Verifikation der um den „Safety Buffer“ erhöhten Radar Höhendaten sind Tabelle 5.18 zu entnehmen.

Tabelle 5.18: Verifikation der global gepufferten Geländemodelle

| Geländemodell | „Safety Buffer“ [m] | σ [m] | mittl. Abweichung [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|--|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <i>Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald</i> | | | | |
| X-Band DHM | 10,00 | 6,53 | -6,74 | -0,37 |
| C-Band DHM | 12,00 | 9,13 | -11,33 | -0,62 |
| <i>Untersuchungsgebiet Pfronten/Ostallgäu</i> | | | | |
| X-Band DHM gesamt | 6,00 | 21,92 | -14,42 | -0,43 |
| C-Band DHM Gesamt | 7,00 | 17,10 | -13,25 | -0,15 |

Für die SRTM X-Band und C-Band Höhenmodelle zeigt sich nach der globalen Pufferung, daß für beide Untersuchungsgebiete die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% deutlich gesenkt werden konnte. Mit den nun errechneten Werten von -0,37 m (X-Band) bzw.

-0,62 m (C-Band) für den Bereich Michelstadt und -0,43 m (X-Band) bzw. -0,15 m (C-Band) für das Gebiet bei Pfronten, konnte die angestrebte Genauigkeit von 3,0 m deutlich unterboten werden. Diese Werte entsprechen exakt den Werten der Genauigkeit (90%) der ursprünglichen Höhenmodelle, abzüglich des addierten „Safety Buffers“.

Wie zu erwarten, läßt sich anhand dieser Ergebnisse erkennen, daß das gesamte Höhenmodell um einen fixen Wert verschoben wurde. Diese Tatsache ist ebenfalls in Abbildung 5.12 deutlich zu erkennen.

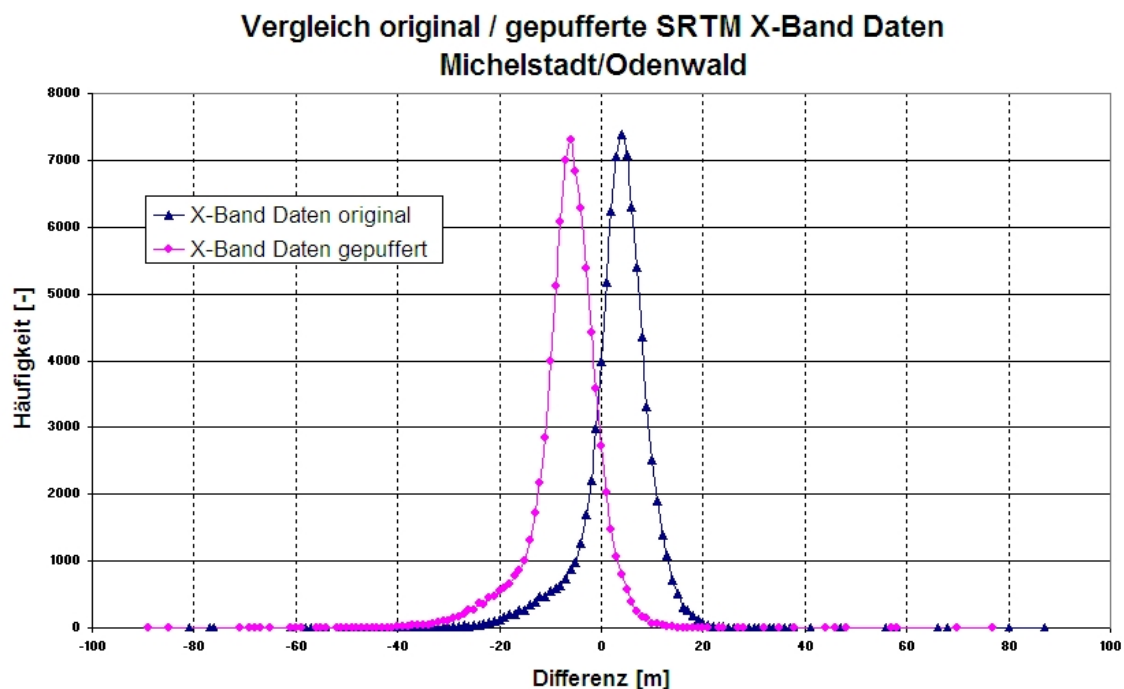


Abbildung 5.12: Fehlervergleich original / pauschal gepufferte X-Band Daten

Hier wird der Verlauf der Differenzen zwischen den X-Band Höhenmodellen vor bzw. nach der globalen Pufferung und dem Referenzmodell gezeigt. Es zeigt sich, daß die Verteilungen der Differenzwerte exakt denselben Verlauf aufweisen. Es hat lediglich eine Verschiebung der Kurve in negativer Richtung der X-Achse stattgefunden. Die mittlere Abweichung der X-Band Daten hat sich für das Untersuchungsgebiet Michelstadt nach der Pufferung um 9,87 m von 3,13 m auf -6,74 m verschoben. Auch dieser Wert entspricht wie erwartet nahezu dem des addierten Puffers. Geringe Differenzen der Ergebnisse zwischen den einzelnen Untersuchungen können auf Rundungs- bzw. Prozessierungsfehler zurückgeführt werden. Für die alpine Region bei Pfronten kann dasselbe Ergebnis festgestellt werden. Die negativen Vorzeichen des mittleren Fehlers zeigen, daß nun die Höhenwerte der modifizierten Geländemodelle insgesamt höher dargestellt werden als im Referenzdatensatz (Wirklichkeit). Diese Tatsache weist auf eine insgesamt geringere Kritikalität der Daten hinsichtlich einer Anwendung in der Luftfahrt hin, als dies für die ursprünglichen unmodifizierten Datensätze der Fall war. Die Standardabweichung vor und nach der Pufferung bleibt aufgrund des pauschalen Puffers ebenfalls identisch.

Zusammengefaßt läßt sich feststellen, daß durch die Addition eines globalen Puffers auf beide Radar-Höhenmodelle in beiden Untersuchungsgebieten eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% erreicht werden konnte. Formal gesehen wären nun somit das 30 m X-Band sowie das 90 m C-Band Höhenmodell geeignet, um für Fluganwendungen im An- und Abflugbereich eines Flughafens eingesetzt zu werden. Eine wirkliche Anpassung der Höhendaten an die Struktur der Referenzdaten konnte nicht erreicht werden. Diese Tatsache läßt sich daran erkennen, daß sich die mittlere Abweichung bzw. der

Extremwert der Häufigkeit der Differenzen nicht an den Nullpunkt der X-Achse angenähert hat. Würde eine Annäherung des Extremwertes an den Nullpunkt erfolgen, könnte eine Anpassung an die Struktur der Referenzdaten erreicht werden.

Ob durch das Verfahren einer partiellen Pufferung dieser Effekt hergestellt werden kann, soll im Folgenden unter Berücksichtigung der Geländeneigung, der topographischen Gegebenheiten wie auch der Reflektionsintensitäten untersucht werden.

5.3.2 Addition des partiellen Puffers der topographischen Analyse

In der vorangegangenen Modifikation des Geländemodells, basierend auf einem globalen Puffer, wurde das gesamte Höhenmodell verschoben, um die angestrebte Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% zu erreichen. Eine Veränderung der Struktur der Daten selbst ist nicht erfolgt.

Tabelle 5.19: „Safety Buffer“ basierend auf der topographischen Analyse

| Oberflächenklasse | Puffer SRTM X-Band DHM [m] | Puffer SRTM C-Band DHM [m] |
|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Bebaute Flächen | 8,00 | 7,00 |
| Verkehrsflächen | 8,00 | 2,00 |
| Laubwald | 14,00 | 17,00 |
| Nadelwald | 11,00 | 14,00 |
| Mischwald | 12,00 | 19,00 |
| Grünland | 8,00 | 7,00 |
| Ackerland | 7,00 | 5,00 |

Wie bei der Analyse der Höhenmodelle unter Berücksichtigung der Oberflächenbedeckung in Abschnitt 5.2.3 gezeigt werden konnte, variiert der Fehler der Geländemodelle in Abhängigkeit der topographischen Gegebenheiten. Für Geländeabschnitte mit einer eher dichteren Oberfläche (z.B. Böden) sind geringere Abweichungen von der Referenz zu erkennen als für Oberflächen, die eine einfachere Eindringung der Mikrowellenstrahlung ermöglichen. Aufgrund der zum Teil recht großen Unterschiede der Genauigkeiten zwischen den einzelnen Kategorien der Oberflächentypen, soll dieser Aspekt bei der Modifikation der Höhenmodelle berücksichtigt werden. Somit wird in diesem Teil der Untersuchung das Höhenmodell zerlegt und in Abhängigkeit der einzelnen Oberflächenklassen gepuffert. Die betrachteten Klassen sowie die dazugehörigen „Safety Buffer“ für das X-Band als auch das C-Band Höhenmodell werden in Tabelle 5.19 wiedergegeben.

Schließlich werden die partiell gepufferten Höhendaten wieder zu einem Modell zusammengesetzt, und, wie in Abschnitt 4.5.2, beschrieben, mit dem Referenzdatensatz verglichen.

Die Verifizierung des Verfahrens der partiellen Pufferung, basierend auf der Berücksichtigung der Oberflächenbedeckung, erfolgt für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt im Odenwald.

5.3.2.1 Verifikation des X-Band Höhenmodells

Nach der Addition der in Tabelle 5.19 aufgeführten Sicherheitsmargen auf das ursprüngliche 30 m X-Band Höhenmodell wurden wie schon in den vorangegangenen Untersuchungen die Qualitätsparameter aus der Differenz zu dem photogrammetrischen Referenzdatensatz bestimmt. Die Werte für die Genauigkeit (90%), die Standardabweichung sowie die mittlere Abweichung des partiell gepufferten Geländemodells, sind in Tabelle 5.20 denen der globalen Pufferung gegenübergestellt.

Obwohl bei diesem Verfahren die Charakteristik der Oberflächenbedeckung berücksichtigt wurde, unterscheiden sich die Ergebnisse zwischen dem partiell und dem global gepufferten Höhenmodell nur sehr gering. Beachtet man in diesem Zusammenhang die Rundungen und

Fehler, die im Rahmen der Pufferung wie auch der Prozessierung erfolgt sind, scheint bei einer Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebietes auf den ersten Blick die arbeitsaufwendigere partielle Pufferung keine Vorteile zu bringen.

Tabelle 5.20: Verifikation der partiellen Pufferung X-Band (topographische Analyse)

| Korrekturverfahren | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| Globale Pufferung | -6,74 | 6,53 | -0,37 |
| Topographische Analyse | -6,30 | 6,70 | -0,33 |

Vergleicht man die in Abbildung 5.13 dargestellten Fehlerverläufe der partiellen und der pauschalen Pufferung, so läßt sich auch hier kein nennenswerter Unterschied erkennen.

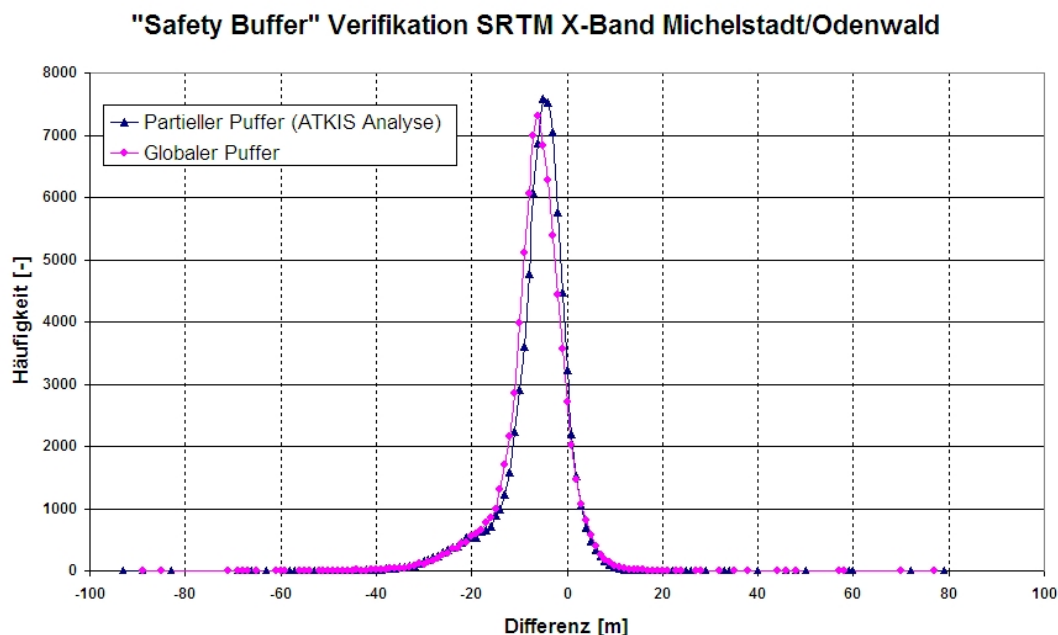


Abbildung 5.13: Fehlervergleich partiell / pauschal gepufferte X-Band Daten

Bei genauerer Betrachtung ist dieses Ergebnis allerdings zu erwarten. Analysiert man nämlich das gesamte Untersuchungsgebiet mit all seinen verschiedenen Oberflächenklassen, muß sich nach Gleichung (5.1) für die globale wie auch für die partielle Pufferung dasselbe Resultat einstellen.

$$P_g = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i * A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (5.1)$$

mit: P_g = globaler Puffer
 P_i = partieller Puffer
 A_i = Teilgebiet

Vollzieht man diesen Zusammenhang konkret für das partiell gepufferte 30 m X-Band Modell nach, ergibt sich unter Berücksichtigung der in Tabelle 5.10 aufgeführten Flächen der einzelnen Oberflächenklassen sowie den in Tabelle 5.19 dargestellten Werten der partiellen Puffer, daß das partiell modifizierte Höhenmodell dem eines global gepufferten Datensatzes mit 9,5 m Puffer entsprechen muß. Zieht man nun in Betracht, daß das global gepufferte Modell mit einer Sicherheitsmarge von 10 m belegt wurde, so sind die in Tabelle 5.20 und

Abbildung 5.13 dargestellten Ergebnisse unter Berücksichtigung von Rundungs- und Prozessierungsfehlern durchweg plausibel.

Schließlich bleibt die Frage zu beantworten, wo die Vorteile der partiellen Pufferung im Gegensatz zur globalen Pufferung liegen, wenn bei der Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebietes keine Vorteile zwischen den einzelnen Modifikationsmethoden zu erkennen sind.

Der Sicherheitsgewinn der partiellen Modifikation wird deutlich, wenn man nicht das gesamte Untersuchungsgebiet mit einer Vielzahl an Oberflächenklassen betrachtet, sondern einzelne Kategorien. Erst hier läßt sich der Vorteil einer partiellen Modifikation darlegen. Dazu wird anhand zweier Oberflächenklassen mit einer deutlichen Differenz zwischen den Genauigkeiten (90% Konfidenzintervall) exemplarisch die Auswirkung einer globalen wie auch partiellen Pufferung diskutiert. In diesem Zug wurde zum einen die Klasse Ackerland mit einer Genauigkeit (90%) von 6,90 m sowie die Kategorie Mischwald mit einer Genauigkeit (90%) von 11,42 m genauer betrachtet. Die Resultate dieses Vergleiches können Tabelle 5.21 entnommen werden.

Tabelle 5.21: Vergleich topographische/globale Pufferung X-Band (ausgesuchte Klassen)

| Oberflächenklasse/Pufferung | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Mischwald / global | -5,77 | 7,76 | 1,60 |
| Mischwald / partiell | -7,77 | 7,75 | -0,42 |
| Ackerland / global | -6,57 | 3,68 | -3,09 |
| Ackerland / partiell | -3,56 | 3,64 | -0,11 |

Betrachtet man die global gepufferte Oberflächenklasse Mischwald, zeigt sich, daß im Gegensatz zur partiellen Modifikation die Genauigkeit (90%) ein schlechteres Ergebnis erzielt. Der Wert liegt bei 1,60 m im Gegensatz zu -0,42 m der partiellen Anpassungsmethode. Zwar können hier beide Pufferungsmethoden die geforderte Genauigkeit (90%) von +3,00 m halten, doch im Vergleich zur spezifischen Pufferung ist der global veränderte Datensatz niedriger und somit sicherheitskritischer. Die Standardabweichungen der Datensätze sind wie zu erwarten identisch.

Die mittlere Abweichung betreffend, schneidet die partielle Pufferung schlechter ab. Sie liegt mit -7,77 m genau 2,00 m unter dem Resultat der globalen Pufferung. Diese 2 Meter entsprechen der Differenz zwischen dem pauschalen und partiellen Puffer über der Objektklasse Mischwald.

Prüft man nun die Ergebnisse für die Kategorie Ackerland, erkennt man, daß die ermittelten Werte konträr zu denen des Mischwaldes sind. Bei einer gleichbleibenden Standardabweichung konnte hier für die globale Pufferung eine Genauigkeit (90%) von -3,09 m im Gegensatz zu -0,11 m für die partielle Pufferung erlangt werden. Somit weist der global gepufferte Geländeabschnitt eine höhere Sicherheit auf als das partiell modifizierte Geländemodell, wenngleich diese nicht gefordert wird. Wirft man nun einen Blick auf die mittlere Abweichung, wird klar, daß die höhere Genauigkeit (90%) des global gepufferten Geländedatensatzes zu Lasten dieses Parameters geht. Hier schneidet der global gepufferte Geländeabschnitt um fast genau 3,00 m schlechter ab, was auch hier der Differenz zwischen dem globalen und dem Puffer für die Klasse Ackerland entspricht.

Zusammenfassend läßt sich am Beispiel der 30 m SRTM X-Band Höhendaten feststellen, daß der Vorteil der partiellen Geländepufferung erst erkennbar wird, wenn man einzelne Oberflächenkategorien betrachtet. Dabei können zwei Fälle unterschieden werden: Zum einen gibt es den Fall, bei dem der partielle Puffer geringer ist als die globale Sicherheitsmarge wie auch die umgekehrte Situation. Hier liegt der partielle „Safety Buffer“ unter dem Wert der globalen Sicherheitsmarge. Es wird für den betrachteten Geländeabschnitt zwar ein besserer

Wert für die Genauigkeit (90%) erreicht, der jedoch zum Einhalten der von [RTC05a] und [ICA04] geforderten Genauigkeiten nicht notwendig ist. Negativ auf die Qualität des Geländemodells wirkt sich hier aus, daß die mittlere Abweichung zunimmt, was ein Indikator dafür ist, daß das modifizierte Höhenmodell stärker von den Referenzdaten (Realität) abweicht. Ist der globale Puffer niedriger als der partielle Puffer, kann dies definitiv sicherheitskritische Auswirkungen haben. Zwar wird so ein größere mittlere Abweichung vermieden, jedoch ist die Differenz zwischen globalem und partiellem Puffer größer als 3,00 m, sind die Anforderungen von [RTC05a] und [ICA04] für Area 2 über der betrachteten Oberflächenklasse nicht zu halten. In dem in Tabelle 5.21 gezeigten Beispiel für die Kategorie Mischwald ist diese Relevanz nicht eindeutig zu erkennen, da die Differenz zwischen globaler und partieller Modifikation gerade einmal zwei Meter betragen. Eindeutig läßt sich diese Tatsache an einem Beispiel mit signifikanteren Höhenunterschieden zwischen den einzelnen Arten der Puffer zeigen. Hierzu soll im Folgenden die Pufferung der 90 m SRTM C-Band Daten unter Berücksichtigung der Oberflächenbedeckung betrachtet werden.

5.3.2.2 Verifikation des C-Band Höhenmodells

Schließlich wurde das C-Band Höhenmodell ebenfalls mit den in Tabelle 5.19 dargestellten „Safety Buffern“, basierend auf der topographischen Analyse, modifiziert und mit dem global gepufferten C-Band Geländemodell verglichen. Die Ergebnisse des Vergleiches sind in Tabelle 5.23 dargestellt.

Tabelle 5.22: Verifikation der partiellen Pufferung C-Band (topographische Analyse)

| Korrekturverfahren | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Conf. Level 90% [m] |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Globale Pufferung | -11,33 | 9,13 | -0,62 |
| Topographische Analyse | -9,93 | 10,22 | 0,26 |

Auch hier zeigt sich, daß die Werte für die globale und die partielle Pufferung praktisch identisch sind. Die Abweichungen der Qualitätsparameter zwischen den einzelnen Pufferungsarten sind auf die Prozessierung des Höhenmodells zurückzuführen. Bei der Zerlegung der 90 m Geländedaten in die einzelnen topographischen Klassen wie auch bei der Wiederzusammensetzung des modifizierten Höhenmodells, ist aufgrund der großen Stützstellenabstände des C-Band Modells mit einem größeren Einfluß des Bearbeitungsvorgangs zu rechnen als beispielsweise bei dem X-Band Höhenmodell mit einem dreimal kleineren Stützstellenabstand.

Somit kann auch hier, wie durch Gleichung (5.1) beschrieben, keine Aussage darüber gemacht werden, ob die partielle Pufferung im Gegensatz zur pauschalen Modifikation den sicherheitsbringenden Vorteil beinhaltet, der den erhöhten Arbeitsaufwand rechtfertigt. Aus diesem Grund wird wie bei den gepufferten X-Band Geländedaten der Vergleich der Modifikationsmethoden anhand von zwei Oberflächenklassen, Ackerland und Mischwald, untersucht. Die im Ausgangsmodell festgestellten Genauigkeiten (90%) betrugen für das gesamte Höhenmodell 11,50 m, für die Klasse Ackerland 4,80 m und für die Kategorie Mischwald 18,50 m. Aus diesen Werten wurden schließlich die „Safety Buffer in der Größe von 12,00 m, 5,00 m bzw. 19,00 m abgeleitet.

Im Gegensatz zu der in Abschnitt 5.3.2.1 durchgeführten Verifikation der SRTM X-Band Daten zeigt sich, daß die partiellen Puffer um jeweils 7,00 m von dem globalen Puffer abweichen. Wie zuvor diskutiert, reicht diese Spanne zwischen den einzelnen Puffern aus, damit sich ein signifikanter Sicherheitsverlust bei der Addition einer globalen Sicherheitsmarge ergibt, sofern eine Genauigkeit von 3,00 m bei einem Konfidenzintervall von 90% unbedingt gewährleistet werden soll. Die Ergebnisse der verschiedenen Pufferungsmethoden über bestimmten Oberflächen sind in Tabelle 5.23 wiedergegeben.

Anhand dieses Beispiels läßt sich sehr gut verdeutlichen, daß die partielle Pufferung der globalen überlegen ist, wenn man davon ausgeht, daß ein Flugzeug sich nie über einem Gesamtgebiet befinden kann, sondern stets nur einzelne Oberflächenklassen überfliegt.

Tabelle 5.23: Vergleich topographische/globale Pufferung C-Band (ausgesuchte Klassen)

| Oberflächenklasse/Pufferung | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Mischwald / global | -8,16 | 12,90 | 6,52 |
| Mischwald / partiell | -16,16 | 12,42 | -1,11 |
| Ackerland / global | -11,99 | 4,80 | -7,09 |
| Ackerland / partiell | -4,26 | 5,31 | 0,55 |

Auch für das C-Band Höhenmodell können erneut die folgenden Fallunterscheidungen vorgenommen werden. Zum einen der Fall, daß der partielle Puffer größer ist als der globale (Mischwald), zum anderen, daß der globale Puffer größer ist (Ackerland). Prüft man den Fall des Ackerlandes, bei dem der globale Puffer größer ist als der partielle, zeigt sich erneut, daß das Erreichen der angestrebten Schranke von +3,00 m für die Genauigkeit (90%) mit -7,09 m problemlos erreicht werden kann, jedoch um den Preis einer sehr hohen mittleren Abweichung von -11,99 m. Um die mittlere Abweichung in einem akzeptablen Rahmen zu halten und dennoch die von [RTC05a] und [ICA04] geforderte Genauigkeit gewährleisten zu können, bietet der partielle Puffer mit einer erreichten Genauigkeit von 0,55 m die bessere Lösung.

Sicherheitskritisch hingegen zeigt sich die Anwendung des globalen Puffers über dem Gebiet Mischwald. In diesem Abschnitt, in dem der globale Puffer 7,00 m unter der partiellen Sicherheitsmarge liegt, kann ein sicheres Operieren des Flugzeuges hinsichtlich der Area 2 nicht mehr erfolgen. Zwar weist nun die mittlere Abweichung die besseren Ergebnisse auf, doch bleibt die Genauigkeit (90%) mit 6,52 m deutlich hinter den Forderungen zurück.

Anhand des dargestellten Beispiels kann deutlich gezeigt werden, inwieweit die Bewertung von Höhendaten zu zwei verschiedenen Ergebnissen hinsichtlich ihrer Kritikalität führen kann, wenn grundsätzliche Randbedingungen außer Betracht gelassen werden. Zeigten die SRTM-C-Band Höhendaten nach der Verifikation des global gepufferten Gesamtgebietes noch sehr gute Ergebnisse hinsichtlich ihrer Genauigkeit (90%), so wird nach der Betrachtung von einzelnen Teilgebieten deutlich, daß diese Höhendaten bei weitem nicht über das gesamte Untersuchungsgebiet hinweg als unkritisch zu betrachten sind. Schwerwiegende Sicherheitsdefizite sind insbesondere dort zu erwarten, wo der globale Puffer niedriger ist als die partielle Sicherheitsmarge. Ist diese Differenz zwischen den Pufferungsarten nun auch noch größer als 3,00 m, so kann die angestrebte Genauigkeit (90%) für die Area 2 über der jeweiligen Klasse nicht sichergestellt werden. Für den betrachteten Fall der SRTM C-Band Daten würde diese Tatsache für die Oberflächenklassen Laub- und Mischwald zutreffen. Wie sich diese Problematik hinsichtlich einer Analyse des Einflusses der Geländesteigung darstellt, soll im Folgenden betrachtet werden.

5.3.3 Addition des partiellen Puffers der Geländeneigungsanalyse

Im Gegensatz zur Modifikation der Radarhöhendaten, basierend auf der Analyse der Oberflächenbedeckung, stehen für eine Bewertung der Ergebnisse beide Untersuchungsgebiete zur Verfügung. Zum einen kann der Effekt des „Safety Buffers“ für eine Mittelgebirgslandschaft betrachtet werden, zum anderen besteht die Möglichkeit, eine alpine Region genauer zu untersuchen. Der Einfluß der Steigung auf die Qualität der SRTM X- und C-Band Höhendaten wurde somit für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt/Odenwald wie auch das Untersuchungsgebiet Pfronten/Ostallgäu durchgeführt. Aus den in Abschnitt 5.2.4.2 durchgeführten Analysen des Steigungseinflusses wurden

schließlich die in Tabelle 5.24 aufgeführten „Safety Buffer“ je nach Steigungsklasse und Untersuchungsgebiet bestimmt.

Auch hier wurden die Werte für die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% auf die nächst größere ganze Zahl gerundet und auf den entsprechenden Geländeabschnitt addiert. Schließlich wurden die modifizierten Geländemodelle wieder zusammengefügt und erneut mit den Referenzdatensätzen abgeglichen sowie hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit in der Luftfahrt ausgewertet. Die Ergebnisse der Pufferung, basierend auf der Analyse der Steigungsgegebenheiten in den Untersuchungsgebieten, werden für den X- und C-Band Radarsensor nachfolgend diskutiert.

Tabelle 5.24: „Safety Buffer“ der partiellen Pufferung (Steigungsanalyse)

| Steigungsklasse/ Safety Buffer [m] | 0-10° | 10-20° | 20-30° | 30-40° | 40-50° | 50-60° | 60-70° | >70° |
|---|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald | | | | | | | | |
| SRTM X-Band | 10,00 | 10,00 | 12,00 | 11,00 | - | - | - | - |
| SRTM C-Band | 10,00 | 15,00 | 24,00 | 29,00 | - | - | - | - |
| Untersuchungsgebiet Pfronten/Ostallgäu | | | | | | | | |
| SRTM X-Band | 3,00 | 3,00 | 9,00 | 11,00 | 13,00 | 18,00 | 26,00 | 29,00 |
| SRTM C-Band | 2,00 | 3,00 | 11,00 | 13,00 | 14,00 | 20,00 | 23,00 | 32,00 |

5.3.3.1 Verifikation des X-Band Höhenmodells

Nachdem das X-Band Höhenmodell den Prozeß einer partiellen Pufferung bezüglich der identifizierten Steigungsklassen durchlaufen hatte, wurden die modifizierten Höhendaten erneut mit den Referenzmodellen verglichen. Nochmals wurden die relevanten Qualitätsparameter bestimmt, um letztlich eine Antwort hinsichtlich der Verlässlichkeit der vorgestellten Methode zu erhalten. Die Ergebnisse der Modifizierung der X-Band Daten für die untersuchten Gebiete werden nachfolgend genauer beschrieben.

Michelstadt/Odenwald

Für das betrachtete Untersuchungsgebiet beträgt der in Abschnitt 5.3.1 bestimmte globale „Safety Buffer“ 10,00 m. Vergleicht man diesen Wert mit den für diesen Abschnitt ermittelten Sicherheitsmargen nach der Steigungsanalyse, beträgt die Differenz zwischen den Pufferungsarten gerade einmal 2,00 m bzw. 1,00 m in Bereichen mit einer Geländesteigung >20%. Wie bei der Analyse des Einflusses der Oberflächenbedeckung gezeigt werden konnte, macht es bei solch geringen Unterschieden zwischen partiellem und globalem Puffer keinen großen Sinn eine solche Fallunterscheidung zu untersuchen. Um trotzdem die Plausibilität der Ergebnisse überprüfen zu können, wurde das gepufferte X-Band Höhenmodell mit dem Referenzgeländemodell verglichen und den Qualitätsparametern der globalen Pufferung in Tabelle 5.25 gegenübergestellt.

Tabelle 5.25: Verifikation partielle Pufferung X-Band Odenwald (Steigungsanalyse)

| Korrekturverfahren | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Globale Pufferung | -6,74 | 6,53 | -0,37 |
| Steigungsanalyse | -6,91 | 7,08 | 0,10 |

Auch für diesem Fall zeigt sich, daß die Ergebnisse der partiellen Pufferung mit denen der globalen Pufferung identisch sind, sofern man das Gesamtgebiet betrachtet. Fehler des Pufferungsvorganges können somit ausgeschlossen werden.

Durch eine Untersuchung von ausgewählten Abschnitten soll auch hier gezeigt werden, wie sich die Pufferungsmethode über ausgewählten Oberflächenklassen verhält. Hierzu wird

innerhalb einzelner Kategorien der Oberflächenbedeckung untersucht, inwieweit das durch die Steigungsanalyse modifizierte Gelände die Gegebenheiten der Referenz wiedergibt. Die betrachteten Klassen sind im diesen Fall erneut die Kategorie Ackerland mit der besten Genauigkeit (90%) sowie die beiden bewaldeten Gebiete Misch- und Nadelwald, welche die schlechtesten Ergebnisse hinsichtlich der Genauigkeit (90%) liefern. Die Ergebnisse dieser Analyse sind Tabelle 5.26 zu entnehmen.

Tabelle 5.26: Pufferung X-Band nach Steigungsanalyse (ausgewählte Gebiete)

| Oberflächenklasse/Pufferung | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Ackerland | -6,81 | 6,31 | -2,72 |
| Nadelwald | -6,88 | 10,10 | 0,92 |
| Mischwald | -6,23 | 9,10 | 1,99 |

Berücksichtigt man auch hier Rundung und Prozessierungsfehler, zeigt sich, daß für alle drei betrachteten Kategorien in etwa dieselbe mittlere Abweichung festgestellt werden kann. Die Standardabweichung hingegen variiert recht deutlich zwischen Bereichen ohne und mit signifikanter Bedeckung, wobei hier für die Klasse Ackerland mit 6,31 m ein deutlich besseres Ergebnis erreicht werden kann als für die Bereiche Nadelwald (10,10 m) und Mischwald (9,10 m). Überraschend ist an dieser Stelle, daß trotz eines gleichen mittleren Fehlers, die Genauigkeit (90%) um etwa 5,00 m variiert. Dennoch können nach der Pufferung, basierend auf den Ergebnissen der Steigungsanalyse für alle betrachteten Klassen der Oberflächenbedeckung Ergebnisse erzielt werden, die den Anforderungen für Area 2 genügen. Somit scheint zumindest für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt die betrachtete Pufferungsmethode ein adäquates Mittel zu sein, um die X-Band Höhendaten so zu modifizieren, daß diese sowohl für das gesamte Untersuchungsgebiet wie auch für einzelne Teilgebiete brauchbare Ergebnisse liefert.

Inwieweit sich größere Steigungsunterschiede auf die Pufferung der X-Band Daten auswirken, soll im Folgenden für das alpine Untersuchungsgebiet im Ostallgäu untersucht werden.

Pfronten/Ostallgäu

In dem betrachteten Untersuchungsgebiet Pfronten/Ostallgäu variieren die zur Pufferung des Geländemodells verwendeten Sicherheitsmargen erheblich. Beträgt der Puffer für die Steigungsklassen 0-10° und 10-20° gerade einmal 3,00 m, konnten für Abschnitte mit sehr starker Geländeneigung ein „Safety Buffer“ von 26,00 m (60-70°) bzw. 29,00 m (>70°) ermittelt werden. Stellt man diesen Werten die für das Gesamtgebiet ermittelte Genauigkeit (90%) von 5,50 m und somit einen pauschalen Puffer von 6,00 m gegenüber, wird deutlich, daß unter derart alpinen Bedingungen die Verwendung eines pauschalen Puffers deutliche Sicherheitsdefizite mit sich bringt.

Tabelle 5.27: Verifikation partielle Pufferung X-Band Ostallgäu (Steigungsanalyse)

| Korrekturverfahren | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Globale Pufferung | -14,42 | 21,92 | -0,43 |
| Steigungsanalyse | -15,09 | 22,97 | -0,15 |

Zuerst wurde auch in dieser Untersuchung das mit einem globalen Puffer belegte Höhenmodell mit den auf der Basis der Steigungsanalyse modifizierten Höheninformationen verglichen. Wie die Ergebnisse in Tabelle 5.27 zeigen, stimmen auch hier die Werte weitgehend überein, so daß bis auf die üblichen Genauigkeitsverluste, die durch das Zerlegen und Wiederaussetzen der Höhenmodelle entstehen, keine Fehler beim Pufferungsprozeß der Daten festzustellen sind.

Es zeigt sich, daß, sofern man das gesamte Untersuchungsgebiet betrachtet, beide Pufferungsarten die Anforderungen von [RTC05a] und [ICA04] für den Gebrauch von digitalen Höheninformationen in Area 2 erfüllen. Zieht man allerdings die festgestellten Differenzen der einzelnen Puffer für dieses Gebiet in Betracht, wird deutlich, daß innerhalb des Geländemodells zwischen der pauschalen und partiellen Pufferung deutliche Unterschiede auftreten.

Aus diesem Grund werden auch hier die einzelnen Abschnitte separat beleuchtet. Insgesamt werden für vier Steigungsklassen die Qualitätsparameter für das pauschal und partiell gepufferte Höhenmodell verglichen. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 5.28 aufgeführt.

Tabelle 5.28: Vergleich Pufferung X-Band Ostallgäu (ausgewählte Steigungsklassen)

| Steigungsklasse/Pufferung | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 0-10° / global | -9,59 | 7,89 | -3,98 |
| 0-10° / partiell | -5,62 | 7,72 | -0,38 |
| 40-50° / global | -19,82 | 29,17 | 6,90 |
| 40-50° / partiell | -26,27 | 30,45 | 1,31 |
| 50-60° / global | -23,16 | 38,67 | 16,86 |
| 50-60° / partiell | -34,08 | 37,94 | 4,15 |
| 60-70° / global | -35,61 | 51,07 | 14,34 |
| 60-70° / partiell | -54,88 | 51,69 | -5,00 |

Wie bei der Analyse der auf der Basis der Oberflächenbedeckung gepufferten Höhenmodelle zeigt sich, daß für Bereiche, bei denen der pauschale Puffer größer ist als der partielle, sich kein sicherheitskritischer Zustand einstellt. Die Genauigkeit (90%) nimmt in unkritischer Richtung zu (negatives Vorzeichen). Von Nachteil bleibt bei der globalen Pufferung, daß sich im Gegensatz zur partiellen Pufferung die mittlere Abweichung deutlich vergrößert.

Als kritisch erweist sich auch hier der Fall, wenn der globale Puffer geringer ist als der partielle. Wie sich anhand der Ergebnisse für die ausgewählten Steigungsklassen zwischen 40° und 70° zeigt, verfehlt die Genauigkeit (90%) mit Werten zwischen +6,90 m und +16,86 m deutlich die Grenze von +3,00 m. Befände sich also bei einer pauschalen Pufferung ein Flugzeug über solch einem Geländeabschnitt, müßte der Datensatz als sicherheitskritisch erachtet werden. Bessere Ergebnisse sind von der partiellen Pufferung zu erwarten. Dies zeigen die Ergebnisse der auf der Basis der Steigungsanalyse durchgeführten Modifikation in Tabelle 5.28.

Allerdings können anders als bei den bereits durchgeführten Pufferungen auf der Basis von partiellen Sicherheitsmargen überraschenderweise nicht für alle Klassen die geforderte Genauigkeit (90%) von 3,00m erreicht werden. Für die Steigungsklasse 50-60° konnte bei der Verifizierung des gepufferten Höhenmodells lediglich ein Wert von 4,15 m festgestellt werden. Auch für die Klasse 60-70° konnte mit -5,00 m eine sehr große Abweichung vom Sollwert 0,00 m bestimmt werden.

Anhand dieser insgesamt sehr großen Spanne der Genauigkeiten (90%) für die Ergebnisse der partiellen Pufferung, basierend auf der Steigungsanalyse, läßt sich sehr gut die Ungenauigkeit darlegen, die durch die Zerteilung und Wiederausammensetzung des zu modifizierenden Geländemodells entsteht. Sind nämlich die Flächen der zu extrahierenden Klassen im Vergleich zu dem Stützstellenabstand des untersuchten Rasterdatensatzes zu klein, entstehen bei der Zerlegung und Wiederausammensetzung der Höhendaten Ungenauigkeiten, die bei dem gepufferten Modell zu schlechteren Ergebnissen führen als es das Modifikationsverfahren vermuten läßt. Beispielhaft ist in Abbildung 5.14 ein Ausschnitt solch eines

ungünstigen Verhältnisses zwischen der Fläche der untersuchten Kategorie (50-60° Steigung) und dem Stützstellenabstand (90 m C-Band Höhenmodell) dargestellt.

In den vorangegangenen Untersuchungen konnte ein besonders ungünstiges Verhältnis zwischen der Größe der einzelnen Flächen der zu untersuchenden Kategorien und dem Stützstellenabstand der untersuchten Geländemodelle nicht festgestellt werden. Bis zu diesem Analyseschritt konnten die angestrebten Genauigkeiten trotz Prozessierungsfehler stets eingehalten werden. Die entstandenen Ungenauigkeiten lagen bisher in einer akzeptablen Größenordnung.

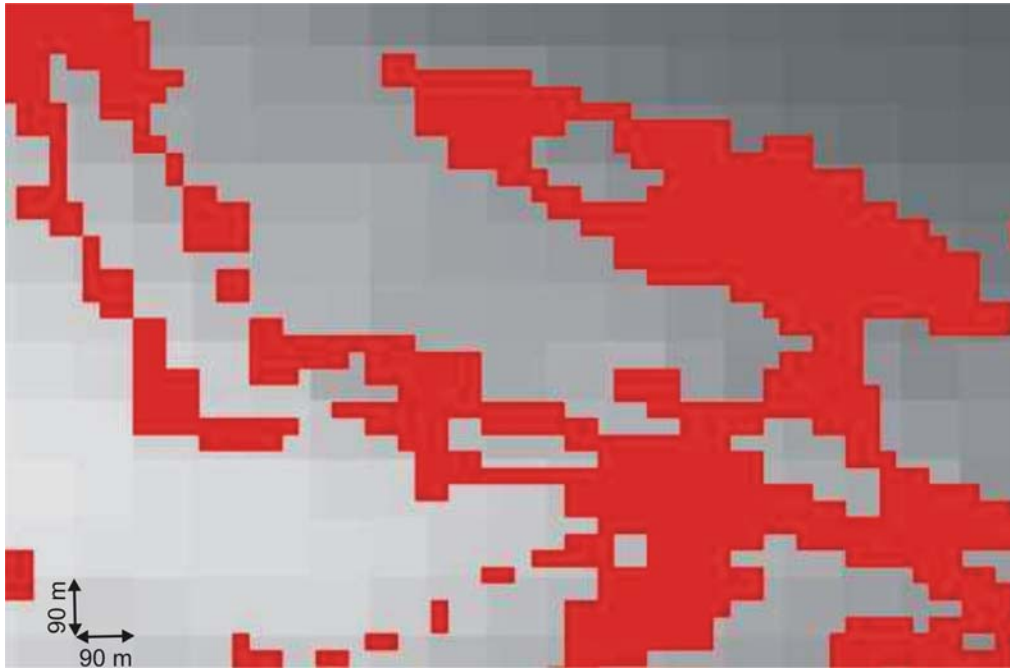


Abbildung 5.14: Ungünstiges Verhältnis untersuchte Kategorie/Stützstellenabstand

Wurde in diesem Abschnitt bereits für das X-Band Modell mit einem Stützstellenabstand von 30 m ein derart problematisches Verhältnis zu den zu untersuchenden Klassen festgestellt, dürfte im Folgenden für das 90 m C-Band Modell eine wesentlich größere Ungenauigkeit vorgefunden werden.

5.3.3.2 Verifikation des C-Band Höhenmodells

An die Analyse des Einflusses der Geländesteigung auf die SRTM X-Band Höhenmodelle anschließend, soll nun dieser Einflußfaktor hinsichtlich seiner Auswirkung auf das 90 m C-Band Modell untersucht werden. Auch hier wird die Untersuchung sowohl für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt im Odenwald wie auch für die alpine Region bei Pfronten im Ostallgäu vorgenommen. Die Ergebnisse des Verifikationschrittes werden nachfolgend beschrieben.

Michelstadt/Odenwald

Für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt beträgt der in Abschnitt 5.3.1 bestimmte globale „Safety Buffer“ für das C-Band Modell 12,00 m. Vergleicht man diesen Puffer mit den in Tabelle 5.24 ermittelten Sicherheitsmargen der Steigungsanalyse, so liegen hier die Differenzen der Pufferungsarten zwischen - 2,00 m für die Kategorie 0-10° und 17,00 m für die Klasse 30-40°. Wie bereits diskutiert, stellen große Differenzen (>3,00 m), insbesondere für den Fall, daß der globale Puffer niedriger ist als der partielle, ein ernstzunehmendes Sicherheitsrisiko dar. Somit wird deutlich, daß im Gegensatz zu den X-Band Daten für das C-Band Höhenmodell schon im Untersuchungsgebiet Michelstadt auf jeden Fall eine partielle Pufferung durchgeführt werden muß, um ein Gefahrenpotential ausschließen zu können.

Um auch an dieser Stelle einen Fehler beim Pufferungsprozeß der C-Band Höhendaten ausschließen zu können, werden in Tabelle 5.29 die ermittelten Qualitätsparameter für die globale und partielle Pufferung einander gegenüber gestellt.

Tabelle 5.29: Verifikation partielle Pufferung C-Band Odenwald (Steigungsanalyse)

| Korrekturverfahren | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Globale Pufferung | -11,33 | 9,13 | -0,62 |
| Steigungsanalyse | -10,80 | 10,00 | 0,52 |

Auch hier können bis auf geringe Differenzen, die auf die Prozessierung des Datenmaterials zurückzuführen sind, keine nennenswerten Unregelmäßigkeiten festgestellt werden. Somit kann auch hier von einer korrekten Modifikation der Höhendaten ausgegangen werden.

Tabelle 5.30: Pufferung C-Band nach Steigungsanalyse (ausgewählte Gebiete)

| Oberflächenklasse/Pufferung | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Ackerland | -11,04 | 5,79 | -5,20 |
| Nadelwald | -8,52 | 11,87 | 4,47 |
| Mischwald | -9,63 | 11,74 | 3,15 |

Ebenfalls soll an ausgewählten Kategorien der Oberflächenbedeckung untersucht werden, wie sich die auf der Steigungsanalyse basierende Pufferungsmethode in Bereichen, die nicht unbedingt in direktem Zusammenhang mit der Geländesteigung stehen, verhält. Hierzu wird erneut innerhalb einzelner Kategorien der Oberflächenbedeckung untersucht, inwieweit das durch die Steigungsanalyse modifizierte Gelände die Gegebenheiten der Referenz wiedergibt. Die betrachteten Klassen sind erneut Ackerland sowie Misch- und Nadelwald. Die für das modifizierte C-Band Höhenmodell gewonnenen Ergebnisse sind Tabelle 5.30 zu entnehmen.

Es zeigt sich, daß nach der erfolgten Pufferung nur für die Klasse Ackerland die angestrebte Grenze der Genauigkeit (90%) von 3,00 m mit -5,20 m eingehalten werden kann. Für die bewaldeten Gebiete liegt der anvisierte Wert 0,15 m bzw. 1,47 m über dem gewünschten Ergebnis. Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, daß bei der Pufferung des 90 m Höhenmodells, basierend auf den Steigungsanalysen, die Einflußfaktoren der Oberflächenbedeckung nicht wettgemacht werden können. Diese Tatsache läßt sich daran erkennen, daß Regionen ohne eine signifikante Bedeckung zu hoch und Gebiete mit einer stark ausgeprägten Vegetation zu niedrig abgebildet werden. War für das 30 m X-Band Modell dieser Einfluß noch zu vernachlässigen, scheint mit einer Zunahme des Stützstellenabstandes die Geländekontur nicht so nachmodellierbar, daß für die zumeist bewaldeten Hänge ein befriedigendes Ergebnis erzielt werden kann. Es zeigt sich, daß für die Pufferung der C-Band Daten in dem mäßig steilen und stark bewachsenen Untersuchungsgebiet bei Michelstadt die Pufferung, basierend auf der Analyse der Oberflächenstruktur, die bessere Wahl darstellt.

Tabelle 5.31: Vergleich Pufferung C-Band Odenwald (ausgewählte Steigungsklassen)

| Oberflächenklasse/Pufferung | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 10-20° / global | -11,87 | 11,25 | 2,43 |
| 10-20° / partiell | -13,66 | 12,14 | 1,47 |
| 20-30° / global | -8,19 | 14,83 | 11,83 |
| 20-30° / partiell | -20,96 | 16,72 | -0,59 |

Wie in Abschnitt 5.3.3.1 beschrieben, wirkt sich ein ungünstiges Verhältnis zwischen Stützstellenabstand der Rasterhöhendaten und Detailliertheit der zu untersuchenden Klasse auf die Genauigkeit der Prozessierung der gepufferten Höhendaten aus. Um zu überprüfen, ob

dieser Einflußfaktor für die C-Band Daten bereits im Untersuchungsgebiet Michelstadt sicherheitsrelevante Auswirkungen hat, wurden in Tabelle 5.31 die Ergebnisse der globalen und partiellen Pufferung für die Steigungsklassen 10-20° sowie 20-30° ermittelt.

Es zeigt sich zwar, daß die partiell gepufferten Gebiete die geforderte Genauigkeit von 3,00 Meter halten können, aber sich dennoch Unregelmäßigkeiten in den Ergebnissen ausmachen lassen. Beispielsweise müßte für die Steigungsklasse 10-20° die Differenz zwischen globalem Puffer (12,00 m) und partiellem Puffer (15,00 m) in den Werten der mittleren Abweichung sowie der Genauigkeit (90%) festzustellen sein. Doch im Gegensatz zu den erwarteten 3,00 m Differenz konnten nur Unterschiede in der Größe von 1,79 m (mittlere Abweichung) und 0,96 m (Genauigkeit (90%)) festgestellt werden. Es scheint sich also auch hier die Problematik, die durch die Zerlegung des Rasters aufkommt, bemerkbar zu machen. Interessant scheint in diesem Zusammenhang, wie sich dieser Aspekt für das Untersuchungsgebiet bei Pfronten auswirkt, wenn schon hier kritische Ergebnisse bei den um den Faktor drei geringer aufgelösten C-Band Daten festgestellt werden konnten.

Pfronten/Ostallgäu

Für das betrachtete Untersuchungsgebiet beträgt die in Abschnitt 5.3.1 bestimmte globale Sicherheitsmarge 7,00 m. Stellt man diesen Puffer den in Tabelle 5.24 ermittelten „Safety Buffern“ der Steigungsanalyse gegenüber, liegen die Unterschiede zwischen den Pufferungsarten zwischen - 5,00 m für die Kategorie 0-10° und 25,00 m für die Klasse >70°. Da die angeführten Puffer Differenzen >3,00 m aufweisen, muß in diesem Untersuchungsgebiet auf jeden Fall eine partielle Pufferung der C-Band Höhendaten erfolgen, damit die angestrebte Genauigkeit (90%) von 3,00 m an jeder Stelle des Geländeabschnittes gewährleistet werden kann.

Auch hier soll versucht werden, einen Fehler beim Pufferungsprozeß der C-Band Höhendaten auszuschließen. Dazu werden in Tabelle 5.32 die ermittelten Qualitätsparameter für die globale und partielle Pufferung einander gegenüber gestellt.

Tabelle 5.32: Verifikation partielle Pufferung C-Band Ostallgäu (Steigungsanalyse)

| Korrekturverfahren | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Globale Pufferung | -13,25 | 17,10 | -0,15 |
| Steigungsanalyse | -14,13 | 26,15 | 8,80 |

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen weist der Vergleich der globalen und der partiellen Pufferung kein identisches Ergebnis auf. Während der global gepufferte Datensatz mit -0,15 m ein sehr gutes Ergebnis für die Genauigkeit (90%) aufweist, bleibt das partiell gepufferte Höhenmodell mit einer Genauigkeit von 8,80 m bei einem Konfidenzintervall von 90% weit hinter den Erwartungen zurück. Da an dieser Stelle eine Unregelmäßigkeit beim Pufferungsprozeß ausgeschlossen werden kann, bleibt als Erklärung für die Diskrepanz der Ergebnisse das Verhältnis zwischen der Detailliertheit der zu extrahierenden Klasse und dem Stützstellenabstand des C-Band Höhenmodells.

Zur Überprüfung der Abweichungen können die in Tabelle 5.33 aufgeführten Vergleiche der globalen und partiellen Puffer für ausgewählte Steigungsklassen herangezogen werden.

Es zeigt sich, daß für den partiellen Puffer der niedrigsten Steigungsklasse (0-10°), welcher durch eher weitläufige Flächen repräsentiert wird, sowohl für die Standardabweichung mit 7,75 m wie auch die Genauigkeit (90%) von -0,30 m sehr gute bzw. erwartete Ergebnisse bestimmt werden konnten. Für die Regionen mit größeren Steigungen zeigt sich, daß die Berechnungen nicht mehr die Resultate liefern, die zu erwarten wären. Betrachtet man beispielsweise die Steigungsklasse 60-70%, kann zum einen der für die partielle Pufferung angestrebte Wert (Genauigkeit (90%)) von 5,30 m nicht erreicht werden. Zum anderen beträgt für denselben Qualitätsparameter die Differenz zwischen der globalen und der partiellen

Pufferung nicht die zu erwartenden 16,00 m, sondern lediglich 9,78 m. Eine ähnliche Diskrepanz läßt sich auch bei der mittleren Abweichung feststellen. Hier beträgt die Differenz zwischen den Pufferungsarten 10,32 m statt der errechneten Differenz zwischen den Puffern von 16,00 m. Ebenfalls für die Standardabweichung ergibt sich ein beachtlicher Unterschied. Anstelle der üblichen identischen Größe dieses Wertes kann hier eine Differenz von 18,83 m festgestellt werden.

Tabelle 5.33: Vergleich Pufferung C-Band Ostallgäu (ausgewählte Steigungsklassen)

| Steigungsklasse/Pufferung | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 0-10° / global | -10,61 | 7,78 | -5,28 |
| 0-10° / partiell | -5,52 | 7,75 | -0,30 |
| 40-50° / global | -16,70 | 22,69 | 4,74 |
| 40-50° / partiell | -22,33 | 24,13 | 1,41 |
| 50-60° / global | -12,07 | 24,53 | 14,21 |
| 50-60° / partiell | -25,35 | 29,24 | 0,81 |
| 60-70° / global | -14,75 | 45,63 | 15,08 |
| 60-70° / partiell | -25,07 | 26,80 | 5,30 |

Anhand der hier beschriebenen Pufferung des 90 m C-Band Höhenmodells, basierend auf der Analyse der Steigungsverhältnisse in einem alpinen Untersuchungsgebiet, wird deutlich, daß das dargelegte Verfahren zur Modifizierung von Höhendaten in der hier durchgeführten Form an die Grenzen einer sinnvollen Umsetzbarkeit kommt. Anders als für das X-Band Höhenmodell konnten für die C-Band Höhendaten weder für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt noch für den Bereich bei Pfronten durch eine partielle Pufferung Ergebnisse erzielt werden, die den Anforderungen der Luftfahrt für Area 2 genügen. Es zeigte sich, daß durch die großen Stützstellenabstände von 90 m auf der einen Seite die Konturen des Oberflächenmodells nicht befriedigend nachmodelliert werden konnten. Zum anderen konnte festgestellt werden, daß, falls der Unterschied zwischen Detailtreue der zu untersuchenden Klasse und Stützstellenabstand des Höhenmodells zu groß wird, die Ungenauigkeiten bei der Zerlegung und Wiederausammensetzung des Höhenmodells so auffällig sind, daß der modifizierte Datensatz in der Luftfahrt keine Anwendung finden dürfte. Um dieses Problem zu lösen, könnte zum einen der zu untersuchende Datensatz in ein Datenmodell höherer Auflösung umgewandelt und nach der Modifikation des Höhenmodells durch die Anwendung eines geeigneten Filters (z.B. max. Filter) in einen Rasterdatensatz mit dem ursprünglichen Stützstellenabstand zurücktransformiert werden. Auf der anderen Seite könnte bei der Selektion der zu untersuchenden Klassen auf die Berücksichtigung von Flächen verzichtet werden, die eine bestimmte Ausdehnung unterschreiten, um somit ein unvorteilhaftes Zerlegen der Rasterdaten zu verhindern.

5.3.4 Addition des partiellen Puffers der Reflektionsintensitätsanalyse

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten untersucht wurde, inwieweit sich digitale Höhenmodelle mit den Erkenntnissen aus der Analyse von Oberflächenbedeckung wie auch den Steigungsverhältnissen modifizieren lassen, soll an dieser Stelle betrachtet werden, ob mit den in Abschnitt 5.2.5.1 gewonnenen Ergebnissen eine sinnvolle Pufferung der Daten erreicht werden kann. In die Untersuchung dieses Einflußfaktors wird lediglich das SRTM X-Band 30 Meter Höhenmodell im Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald berücksichtigt und schließlich durch einen entsprechenden Puffer angepaßt. Hierzu werden aus den in Tabelle 5.14 bestimmten Genauigkeiten (90%) die in Tabelle 5.34 dargestellten „Safety Buffer“ der Reflektionsintensitätsklassen abgeleitet.

Schließlich werden auch hier die entsprechenden Sicherheitsmargen auf das ursprüngliche 30 Meter Höhenmodell addiert und der somit entstandene Datensatz verifiziert. Vergleicht man

auch hier den für das X-Band Höhenmodell ermittelten globalen Puffer von 10,00 m mit den in Tabelle 5.34 dargestellten partiellen Puffern, erkennt man, daß der maximale Unterschied zwischen den Pufferungsarten lediglich 3,00 m beträgt. Aufgrund dieses geringen Unterschiedes sollten sich, sofern keine Rundungs- und Prozessierungsfehler auftreten, keine sicherheitskritischen Unterschiede zwischen dem partiell und dem global gepufferten Höhenmodell ergeben. Dennoch soll in diesem Abschnitt betrachtet werden, wie sich das auf der Basis der Intensitätsanalyse gepufferte Höhenmodell im Vergleich zu dem global gepufferten Höhenmodell verhält. Hierzu wird erneut ein Vergleich für das gesamte Untersuchungsgebiet wie auch für ausgewählte Abschnitte vorgenommen.

Tabelle 5.34: „Safety Buffer“ der partiellen Pufferung (Reflektionsintensität)

| Pixel Wert [-] | „Safety Buffer“ [m] |
|-----------------------|----------------------------|
| 0-4.999 | 13,00 |
| 5.000 - 9.999 | 13,00 |
| 10.000 - 14.999 | 13,00 |
| 15.000 - 19.999 | 12,00 |
| 20.000 - 24.999 | 10,00 |
| 25.000 - 29.999 | 9,00 |
| 30.000 - 34.999 | 9,00 |
| 35.000 - 39.999 | 9,00 |
| 40.000 - 44.999 | 10,00 |
| 45.000 - 49.999 | 10,00 |
| 50.000 - 54.999 | 11,00 |
| 55.000 - 59.999 | 12,00 |
| 60.000 - 64.999 | 12,00 |
| 65.000 - 70.000 | 13,00 |

Wie in der Arbeit bereits gezeigt wurde, muß sich bei einer Betrachtung des gesamten Gebietes sowohl für die globale wie auch die partielle Pufferung hinsichtlich der Qualitätsparameter dasselbe Ergebnis einstellen, sofern sich keine nennenswerten Prozessierungsfehler bemerkbar machen. Um dies zu überprüfen werden in Tabelle 5.35 die Ergebnisse der globalen wie auch der partiellen Pufferung einander gegenübergestellt.

Tabelle 5.35: Verifikation partielle Pufferung X-Band (Reflektionsintensitätsanalyse)

| Korrekturverfahren | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Globale Analyse | -6,74 | 6,53 | -0,37 |
| Steigungsanalyse | -6,19 | 7,57 | 1,96 |

Hier zeigt sich allerdings insbesondere für die Standardabweichung bei einem Sigma wie auch für die Genauigkeit (90%), daß die Werte der beiden Pufferungsmethoden sehr weit auseinander liegen. Demnach kann auch für diesen Pufferungsvorgang von einem ungünstigen Verhältnis zwischen dem Stützstellenabstand des Höhenmodells und den Bezugsflächen der einzelnen Klassen des Radarechobildes ausgegangen werden. Vergleicht man hierzu die Stützstellenabstände der beiden Rasterdatenprodukte, zeigt sich in der Tat ein unvorteilhaftes Verhältnis. Beträgt der Stützstellenabstand der X-Band Höhendaten etwa 30 m, so beträgt dieser für das Radarechobild 25 m (vgl. Abschnitt 4.6.3). Dieser Faktor kann insbesondere bei einem häufigen Wechsel der Kategorien zu einem deutlich feststellbaren Fehler des wieder zusammengesetzten Höhenmodells führen. Trotz der genannten Faktoren kann für das partiell gepufferte Höhenmodell die angestrebte Genauigkeit (90%) von 3,00 m eingehalten werden.

Vergleicht man nun einzelne Klassen nach der partiellen bzw. der globalen Pufferung zeigt sich in Tabelle 5.36, daß in den Ergebnissen der partiellen Pufferung eine Ungenauigkeit feststellbar ist. Zwar sind für die Standardabweichung weitgehend identische Werte zwischen den Pufferungsmethoden festzustellen, doch sowohl für die mittlere Abweichung als auch für die Genauigkeit (90%) bleiben die zu erwartenden Ergebnisse aus. Insbesondere für die Intensitätsklassen 0-5.000 und 60.000-65.000 unterscheiden sich die Differenzen zwischen den Pufferungsarten deutlich von dem zu erwartenden 3,00 m Unterschied zwischen globalem und partiellem Puffer.

Tabelle 5.36: Vergleich Pufferung X-Band Odenwald (ausgewählte Reflektionsklassen)

| Intensitätsklasse/Pufferung | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 0-5.000 / global | -5,85 | 6,45 | 1,17 |
| 0-5.000 / partiell | -7,80 | 7,07 | 0,55 |
| 30.000-35.000 / global | -7,18 | 6,09 | -1,58 |
| 30.000-35.000 / partiell | -6,86 | 6,60 | -0,90 |
| 60.000-65.000 / global | -6,20 | 6,57 | 0,74 |
| 60.000-65.000 / partiell | -7,30 | 6,93 | 0,51 |

Diese Ungenauigkeit ist ein weiterer Beleg dafür, daß sich das Verhältnis der Stützstellenabstände des Höhenmodells sowie des Radarbildes ungünstig auf den durchgeführten Prozeß der partiellen Pufferung auswirkt, auch wenn hier insgesamt die angestrebte Genauigkeit (90%) gehalten werden kann.

Abschließend soll für diese Pufferungsmethode betrachtet werden, welche Genauigkeit das modifizierte Höhenmodell über ausgesuchten Gebieten aufweist. Dazu wurde erneut analysiert, welche Genauigkeit ein auf der Basis der Reflektionsintensität gepuffertes Höhenmodell in Bereichen mit und ohne signifikanter Bedeckung aufweist. Hierzu werden schließlich erneut die Klassen Ackerland sowie Nadel- und Mischwald betrachtet. Die Ergebnisse dieses Vergleiches sind in Tabelle 5.37 dargestellt.

Tabelle 5.37: Pufferung Reflektionsintensitätsanalyse X-Band (ausgewählte Gebiete)

| Oberflächenklasse | mittl. Abweichung [m] | σ [m] | Genauigkeit (90%) [m] |
|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Ackerland | -6,69 | 4,34 | -2,37 |
| Nadelwald | -6,83 | 8,35 | 1,51 |
| Mischwald | -5,93 | 8,45 | 2,57 |

Für alle drei betrachteten Oberflächenklassen zeigt sich, daß die angestrebte Genauigkeit (90%) erreicht werden konnte. Vergleicht man allerdings die Regionen mit und ohne signifikanter Bedeckung, zeigt sich für die bewaldeten Gebiete, daß diese tendenziell zu niedrig abgebildet werden. Die Klasse Ackerland hingegen wird im Vergleich zu den Referenzdaten eher zu hoch abgebildet.

Für das Untersuchungsgebiet Michelstadt zeigt sich nach der Modifikation der X-Band Höhendaten, basierend auf der Analyse der Reflektionsintensitäten, daß insgesamt die angestrebte Genauigkeit erreicht werden konnte. Eine Verbesserung der Ergebnisse könnte auch hier durch ein besseres Verhältnis zwischen dem Stützstellenabstand des Geländemodells sowie der zur Kategorisierung verwendeten Radarechodaten erreicht werden. Hinsichtlich der Genauigkeit der modifizierten Geländedaten, unter der Berücksichtigung der Oberflächenklassen, zeigt sich ebenfalls, daß die geforderte Genauigkeit eingehalten werden kann, doch eine Pufferung auf der Basis der topographischen Gegebenheiten ein besseres Ergebnis liefern würde.

6 Bewertung der Ergebnisse

Ausgehend von der Tatsache, daß die Differenz zwischen wirklicher und reflektierter Oberfläche je nach ihrer Beschaffenheit sehr deutlich ausfallen kann, sollte in der vorliegenden Untersuchung betrachtet werden, wie stark sich dieser Einfluß auf die Genauigkeit der Geländemodelle auswirkt. Ferner sollte analysiert werden, ob sich durch das Addieren des quantifizierten Fehlers auf die Höheninformationen in Form eines „Safety Buffers“ der Datensatz so modifizieren läßt, daß die von der RTCA [RTC05a] und ICAO [ICA04]) geforderten Genauigkeiten eingehalten werden können.

Im Folgenden sollen sowohl die zur Verifikation und Modifikation der Daten durchgeführten Verfahren wie auch die Geländemodelle selbst hinsichtlich eines sinnvollen und sicheren Einsatzes in der Luftfahrt diskutiert werden.

6.1 Bewertung der untersuchten Datensätze

Zunächst werden die betrachteten Datensätze hinsichtlich ihrer Genauigkeit und somit ihrer Nutzbarkeit in der Luftfahrt bewertet. Bei dieser Betrachtung der Höhenmodelle werden auch die Auswahl und Eigenschaften der Referenzdaten kritisch geprüft, um eine korrekte Interpretation der Ergebnisse durchführen zu können.

6.1.1 Bewertung der Referenzdaten

Als Vergleichswerte fanden Kontrollpunkte wie auch vollständige Geländemodelle Anwendung, die unterschiedliche Eigenschaften und Quellen aufwiesen. Inwieweit die einzelnen Referenzdaten geeignet waren, die angestrebten Analysen durchzuführen wird, im Folgenden diskutiert.

6.1.1.1 Kontrollpunktverifikation

Die Gegenüberstellung von Kontrollpunkten mit Höhenmodellen ist ein gängiges Verfahren, um die Genauigkeit von Geländedaten bestimmen zu können (siehe Abschnitt 4.5.1). In der vorliegenden Untersuchung wurde diese Methode angewandt, um insbesondere die Referenzgeländemodelle genauer beurteilen zu können. Die Kontrollpunkte wurden dabei auf zwei verschiedene Art und Weisen erzeugt. Für das Untersuchungsgebiet bei Pfronten im Ostallgäu wurden die Kontrollpunkte vor Ort eingemessen (Abschnitt 5.1.2.2). Dieses Verfahren bietet ein hohes Maß an Genauigkeit der gewonnenen Kontrollpunkte, da die erhobenen Lageinformationen als Primärdaten ohne nennenswerte Prozessierungsfehler vorliegen. Nachteilig gestaltet sich allerdings, daß die gewonnenen Punkte lediglich Informationen über den nackten Boden ohne seine Bedeckung wiedergeben. Somit läßt sich lediglich eine Aussage über die Genauigkeit der Geländemodelle machen, sofern diese ein Geländemodell wiedergeben (DGM) oder nur Abschnitte ohne eine signifikante Bedeckung betrachtet werden.

Für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt im Odenwald wurden die Kontrollpunkte aus einer stereo-photogrammetrischen Umgebung heraus gewonnen (vgl. Abschnitt 5.1.2.1). Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß neben Bodenpunkten auch Punkte auf der Oberfläche der Bodenbedeckung (z.B. Baumdach) gewonnen werden können. Somit bietet es das Potential, auch Oberflächenmodelle (DOM) verifizieren zu können. Nachteilig an diesem Verfahren ist, daß die Punkte keine primären Informationen darstellen, sondern am Ende einer langen Prozeßkette stehen. Der zu erwartende Fehler ist damit deutlich größer als bei Punkten, die durch eine direkte Vermessung gewonnen wurden.

Für die Anwendungsgebiete in dieser Untersuchung konnten beide Arten von Kontrollpunkten ihren Zweck erfüllen. Im Untersuchungsgebiet Michelstadt stand die Betrachtung des Einflusses der Oberflächenbedeckung im Vordergrund. Somit war es unumgänglich, auf Informationen über die „wirkliche“ Oberfläche zurückzugreifen. Durch die sehr inhomogene

Oberfläche der Vegetation konnte in diesem Fall der zu erwartende Fehler der Kontrollpunkte vernachlässigt werden. Für die alpine Region bei Pfronten standen als Kontrollpunkte lediglich die vor Ort vermessenen Bodenpunkte zur Verfügung. Zwar sollten auch in diesem Untersuchungsgebiet die Geländemodelle hinsichtlich eines Oberflächenmodells verifiziert werden, doch wies das betrachtete Gebiet keine signifikante und dichte Bedeckung auf. Da im betrachteten Untersuchungsgebiet primär der Einfluß der Geländeneigung quantifiziert werden sollte, standen die Berghänge im Zentrum des Interesses, die, wenn überhaupt, nur sehr niedrige Vegetation aufwiesen.

Werden Informationen hinsichtlich eines Oberflächenmodells benötigt, ist das Vorhandensein von Kontrollpunkten, welche die Oberflächenbedeckung widerspiegeln, unumgänglich. Gestaltet sich die Gewinnung dieser Daten auch als arbeitsaufwendig und kostspielig, so läßt sich eine seriöse Quantifizierung des Fehlers und eine Bewertung hinsichtlich eines sicheren Einsatzes in der Luftfahrt nur auf diesem Wege durchführen. In Einzelfällen kann unter besonderen Bedingungen (z.B. überwiegend vegetationsarme Flächen) eine entsprechende Verifikation auch mit Bodenpunkten vollzogen werden.

6.1.1.2 Referenzgeländemodelle

Haben Kontrollpunkte stets einen stichprobenartigen Charakter, bietet die Verifikation unter der Anwendung von Geländemodellen die Möglichkeit, einen lückenlosen Vergleich von kompletten Datensätzen vorzunehmen. Sollen auch hier die zu untersuchenden Höhenmodelle hinsichtlich ihrer Abbildung der Erdoberfläche samt ihrer Bedeckung untersucht werden, bedarf es eines echten Oberflächenmodells (DOM). Da insbesondere für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt mit seiner heterogenen Oberflächenbedeckung eine lückenlose Analyse des Einflusses der Oberflächenbedeckung durchgeführt werden sollte, wurde zwingend ein echtes Oberflächenmodell als Referenz benötigt. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, wurde im Rahmen der Untersuchungen ein auf der Basis von stereo-photogrammetrischen Methoden erstelltes Oberflächenmodell erzeugt. Dieses Höhenmodell weist einen Stützstellenabstand von 2,00 m auf, was Analysen mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung erlaubt. Der Datensatz konnte mit Hilfe der durch die in der stereo-photogrammetrischen Umgebung extrahierten Kontrollpunkte verifiziert werden. Die dabei ermittelten Qualitätsparameter weisen mit einer Genauigkeit von 1,15 m bei einem Konfidenzintervall von 90%, einer mittleren Abweichung von 0,22 m und einer Standardabweichung bei einem Sigma von 1,21 m sehr gute Werte auf. Folglich könnte dieses Höhenmodell nicht nur im durch die RTCA [RTC05a] und ICAO [ICA04] beschriebenen Flughafennahbereich Anwendung finden, sondern bietet zugleich das Potential, als Oberflächenreferenz bei der Verifikation der Radar- und Laserdaten zu dienen (siehe Abschnitt 5.1.2.1).

Da die Generierung eines echten Oberflächenmodells sehr arbeitsaufwendig und somit kostenintensiv ist, wurde für das Untersuchungsgebiet bei Pfronten/Ostallgäu sowie für die zusätzlichen Untersuchungsgebiete bei Michelstadt auf Produkte des HVBG (Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation) und der BVV (Bayerische Vermessungsverwaltung) zurückgegriffen. Diese Höhenmodelle des Typs DGM5 weisen einen Stützstellenabstand von 10,00 m auf und repräsentieren ein Geländemodell (DGM). Die abgebildeten Höheninformationen geben also den „nackten Boden“ ohne Bedeckung wieder. Wie bereits bei der Bewertung der Kontrollpunkte beschrieben, stellt diese Tatsache für das alpine Untersuchungsgebiet ein geringeres Problem dar, da hier die Bodenbedeckung im Gegensatz zur Geländesteigung weitgehend zu vernachlässigen ist. Schwieriger ist die Nutzung der DGM5 Daten für den Bereich um Michelstadt. Hier stellt die Oberflächenbedeckung den dominierenden Einflußfaktor dar, den es zu quantifizieren gilt. Soll das DGM5 trotzdem als Referenz dienen, so können verlässliche Angaben über die Qualität nur für Abschnitte ohne signifikante Bedeckung bereitgestellt werden.

Obwohl von Beginn an bekannt war, daß die DGM5 Datensätze nur mit Einschränkungen genutzt werden können, wurden durch einen Vergleich mit den Kontrollpunkten die notwendigen Qualitätsparameter bestimmt (siehe Abschnitt 5.1.2.2).

Für das DGM5 im Bereich Michelstadt konnten sehr gute Werte für die Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall 90% (0,80 m), die Standardabweichung (2,35 m) sowie der mittleren Abweichung (0,21 m) ermittelt werden. Die Verifikation fand hier jedoch ausschließlich über Gebieten statt, die keine Bedeckung aufweisen. Somit geben diese Werte nur beschränkt Auskunft über die Genauigkeit der Höheninformationen, die auf Abschnitten mit einer signifikanten Bedeckung liegen.

Für das Untersuchungsgebiet bei Pfronten konnten bei einem Vergleich des DGM5 mit den vor Ort eingemessenen Kontrollpunkten ein weniger gutes Ergebnis ermittelt werden. Hier beträgt die Genauigkeit (90%) 5,40 m, die mittlere Abweichung 1,35 m und die Standardabweichung 2,85 m. Allerdings sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß die Kontrollpunkte selektiv eingemessen wurden. So wurde die Mehrzahl der Kontrollpunkte in Abschnitten aufgenommen, die durch starke Geländeneigungen geprägt sind (siehe Abschnitt 5.1.2.2). In diesen Bereichen sind schlechtere Genauigkeiten zu erwarten als in Regionen ohne ausgeprägte Steigungswechsel. Diese Tatsache läßt sich auch erkennen, wenn die Qualitätsparameter einzelner Abschnitte im Untersuchungsgebiet Pfronten betrachtet werden. Während in den flachen Abschnitten bei Pfronten Meilingen eine Genauigkeit (90%) von 1,55 m ermittelt werden konnte, beträgt diese an den Hängen des Aggenstein beispielsweise nur 7,85 m (vgl. Abschnitt 5.1.2.2).

Genau betrachtet bietet das DGM5 der Region Pfronten nicht die angestrebte Genauigkeit. Weder kann die von der RTCA [RTC05a] und ICAO [ICA04] geforderte Genauigkeit (90%) von 3,00 m gehalten werden, noch bietet es nach dem Kontrollpunktvergleich das Potential eines Referenzdatensatzes, insbesondere wenn man berücksichtigt, daß das DGM5 den Boden wiedergibt und nicht die wirkliche Oberfläche. Dennoch bietet das DGM5 eine deutlich höhere Genauigkeit als jene, die von den SRTM Radarhöhendaten zu erwarten ist. Aus diesem Grund fand das DGM5 als Referenzdatensatz dennoch Anwendung.

6.1.1.3 Fazit

Die Verifikation von Geländedaten kann sowohl mit Hilfe von Kontrollpunkten wie auch ganzen Datensätzen durchgeführt werden. Dabei gilt es berücksichtigen, unter welchen Randbedingungen die endgültigen Ergebnisse zustande kommen.

Besonders durch den stichprobenartigen Charakter von Kontrollpunkten gilt es zu beachten, ob die Art und Verteilung der Punkte die Charakteristik des betrachteten Geländeabschnittes wiedergeben. Verifiziert man beispielsweise ein dicht bewaldetes Gebiet hinsichtlich eines Oberflächenmodells und verwendet bei der Untersuchung überwiegend Bodenpunkte, wird das Ergebnis nicht die tatsächliche Genauigkeit des Datensatzes wiedergeben. Diese würde voraussichtlich wesentlich besser ausfallen als sie eigentlich zu erwarten wäre. Allerdings existiert auch der umgekehrte Fall. Werden beispielsweise die Kontrollpunkte überwiegend an steilen Hanglagen aufgenommen, kann die bestimmte Genauigkeit deutlich unter dem erwarteten Ergebnis liegen. Somit läßt sich feststellen, daß besonders bei der stichprobenartigen Verifikation mit Kontrollpunkten Art und Anzahl der Punkte das Ergebnis maßgeblich beeinflussen.

Vollzieht man einen Vergleich ganzer Datensätze entfällt zwar der stichprobenartige Charakter, doch muß auch hier berücksichtigt werden, unter welchen Randbedingungen die Bewertung der Höheninformationen durchgeführt wurde. Fragen nach der Vergleichbarkeit der Höhenmodelle (DGM oder DOM) wie auch zu den angegebenen Genauigkeiten der Daten (wie wurde die Qualität der Referenzdaten bestimmt?) müssen gestellt werden. Nur wenn hier die verschiedensten Einflußfaktoren berücksichtigt werden, kann eine zuverlässige Bewertung von Höhendaten für sicherheitskritische Luftfahrtanwendungen erfolgen.

6.1.2 Bewertung der LIDAR Höhenmodelle

In der vorliegenden Untersuchung wurden zwei LIDAR Höhenmodelle betrachtet. Die Befliegung zur Gewinnung des ersten Datensatzes wurde im Jahr 2000 durchgeführt. Das daraus resultierende Höhenmodell weist einen Stützstellenabstand von 10 m auf. Der Datensatz lag nicht mehr in seiner ursprünglichen Form vor und wurde aus zwei vorprozessierten Datensätzen zusammengefügt. Er beinhaltet sowohl Boden- als auch Nichtbodenpunkte und stellt somit eine Mischform eines DGM und eines DOM dar (vgl. Abschnitt 4.3.2). Beruhend auf dieser Tatsache läßt sich dieser nicht mehr exakt hinsichtlich seiner Genauigkeit als DOM bewerten. Der Datensatz aus dem Jahr 2000 liegt für das Zentrum des Untersuchungsgebietes Michelstadt vor und konnte sowohl mit allen dort vorliegenden Kontrollpunkten wie auch dem photogrammetrischen Oberflächenmodell verglichen werden.

Das zweite LIDAR-Höhenmodell wurde während einer Befliegung im Jahr 2004 gewonnen. Dieser Datensatz liegt in seinem Ausgangsformat vor (vgl. Abschnitt 4.3.2), so daß eine Unterscheidung der ersten und letzten Reflektion sowohl für die Höhen- wie auch die Intensitätswerte möglich war. Die Höhenwerte des LIDAR Datensatzes weisen eine höhere Dichte auf, so daß der Rasterabstand auf 5 m festgelegt werden konnte. Diese Höheninformationen stehen nicht für das zentrale Untersuchungsgebiet bei Michelstadt zur Verfügung. Sie bilden zwei zusätzliche Gebiete nördlich und südlich von Michelstadt ab. Diese Geländeabschnitte wurden nicht mehr durch das photogrammetrisch erzeugte Oberflächenmodell abgedeckt. Somit erfolgte die Verifikation des LIDAR Datensatzes mit dem DGM5 des HVBG (vgl. Abschnitt 5.2.2.1). Eine Bewertung der Laserdaten hinsichtlich einer Eignung als DOM ist somit nur mit Einschränkungen möglich.

Die Untersuchung der LIDAR Daten aus dem Jahr 2000 hinsichtlich einer Eignung als DOM zeigt, daß der Datensatz in der vorliegenden Form mit einer Genauigkeit von 13,20 m (Kontrollpunktanalyse) bzw. 15,50 m (Referenzgeländevergleich) nicht für den Einsatz des Flughafennahbereiches geeignet ist (vgl. Abschnitt 5.2.1.1 und 5.2.2.1). Dennoch zeigt sich bei einer differenzierten Betrachtung, daß für die Bodenpunkte die angestrebte Genauigkeit eingehalten werden konnte. Für Nichtbodenpunkte, insbesondere bewaldete Gebiete hingegen fällt das Ergebnis deutlich schlechter aus. Die hier festgestellten Differenzen hinsichtlich der Genauigkeit (90%) zu dem DOM betragen 20,50 m bis 25,00 m. Diese Differenzen entsprechen in etwa den zu erwartenden Baumhöhen (Abschnitt 5.2.3.2). Nachteilig auf die Ergebnisse wirkt sich aus, daß bei diesem Datensatz keine Unterscheidung hinsichtlich der ersten und letzten Reflektion vorgenommen werden konnte und daß die Befliegung in den Wintermonaten durchgeführt wurde. Dadurch war ein vereinfachtes Durchdringen des Laserpulses bis zum Boden möglich. Bestünde die Möglichkeit, diese Faktoren zu minimieren bzw. eliminieren, würden deutlich bessere Ergebnisse zu erwarten sein.

Wie bereits erwähnt, war eine Verifikation der im Jahr 2004 gewonnenen Laserhöhendaten hinsichtlich eines DOM nicht möglich. Die Ergebnisse beziehen sich somit auf den „nackten Boden“. Betrachtet man hier die errechneten Genauigkeiten (90%) für beide Teilgebiete, zeigt sich, daß die Werte sowohl für die erste als auch für die zweite Reflektion zwischen -0,12 m und -0,62 m liegen. Somit zeigt sich, daß eine sehr gute Abbildung des Bodens möglich ist. Bei einer differenzierten Betrachtung der Oberflächenbedeckung erkennt man, daß egal ob erste oder zweite Reflektion, für Bereiche ohne signifikante Bedeckung die Genauigkeiten gleichermaßen gute Ergebnisse liefern. Anders stellt sich die Situation für die Bereiche mit signifikanter Bedeckung (Waldgebiete) dar. Während hier die letzte Reflektion vergleichbare Werte mit allen anderen Gebieten liefert, läßt sich der Einfluß des Waldes bei der ersten Reflektion deutlich erkennen. Insbesondere für den Nadel- und Mischwald sind im Vergleich zur letzten Reflektion Differenzen von mehr als 10 m festzustellen. Hier zeigt sich, daß der Laserpuls weiter oben reflektiert wird. Nicht so deutlich ist dieser Effekt für die Klasse „Laubwald“ festzustellen (Abschnitt 5.2.3.2). Ausschlaggebend dafür ist, daß auch der

Datensatz aus dem Jahr 2004 in den laubfreien Monaten gewonnen wurde. Eine Verbesserung des Ergebnisses hinsichtlich eines DOM ist zu erwarten, wenn die LIDAR-Befliegung in Monaten durchführt würde, in denen die Bäume Laub tragen. Dennoch wäre für eine korrekte Verifikation der Ergebnisse zwingend eine Referenz notwendig, welche die tatsächliche Oberfläche wiedergeben würde. Das hier verwendete DGM5 ist für diesen Zweck weitgehend ungeeignet.

Resümierend läßt sich nach der Verifikation der Laserdaten feststellen, daß die Laseraltimetrie sehr genau arbeitet, sofern die Oberflächen eine hohe Lückenlosigkeit aufweisen. Ob ein belaubtes Blätterdach ausreichend wäre, die Oberfläche eines Waldes so abzubilden, daß die Anforderungen an ein echtes DOM erreicht würden, konnte im Rahmen der Arbeit nicht festgestellt werden, da die vorliegenden Datensätze in den Wintermonaten generiert wurden. Ebenfalls nachteilig erwies sich, daß die Laserdaten entweder in einem ungeeigneten Format vorlagen oder die Referenzen keine Informationen hinsichtlich der Oberflächenbedeckung lieferten. Allerdings lassen die gewonnenen Ergebnisse vermuten, daß bei einer Anwendung eines entsprechenden Maximalwertfilters bei der Auswertung der Höheninformationen der ersten Reflektion ein für sicherheitskritische Luftfahrtanwendungen geeigneter Datensatz bereitgestellt werden könnte. Ein entsprechender Nachweis konnte mit den für die Untersuchungen vorliegenden Datensätzen nicht erbracht werden.

6.1.3 Bewertung der SRTM X-Band Höhenmodelle

In der vorliegenden Untersuchung lag das 30 m SRTM X-Band Höhenmodell für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt wie auch bei Pfronten vor. Die Verifizierung des X-Band Höhenmodells ergab, daß für den Abschnitt bei Michelstadt die angestrebte Genauigkeit (90%) von 3,00 m nach der Kontrollpunktanalyse (10,90 m) wie auch der Referenzmodellanalyse (9,70 m) nicht erreicht werden konnte. Auch für die Region bei Pfronten konnte die angestrebte Genauigkeit (90%) nicht eingehalten werden. Die Genauigkeit (90%) betrug hier nach der Kontrollpunktanalyse 12,50 m und nach dem Referenzmodellvergleich 5,50 m. Auch bei der differenzierten Betrachtung einzelner Einflußfaktoren wie der Oberflächenbedeckung, der Geländesteigung wie auch der Reflektionsintensität, konnte bis auf die Regionen im alpinen Untersuchungsgebiet mit sehr niedrigen Steigungen, die für Luftfahrtanwendungen im Flughafennahbereich angestrebte Genauigkeit nicht erreicht werden, obwohl ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Qualität und den benannten Einflußfaktoren festgestellt werden konnte (Abschnitt 5.2).

Um das X-Band Höhenmodell dennoch in sicherheitskritischen Bereichen verwenden zu können, sollte der Datensatz so modifiziert werden, daß dieser der angestrebten Genauigkeit genügt. Hierzu wurde auf das ursprüngliche Datenmodell ein „Safety Buffer“ addiert, um das Höhenmodell so anzuheben, daß die modifizierten Höhenwerte in der Geländedatenbank kein Gefahrenpotential mehr darstellen. Dieses Verfahren besitzt jedoch nur Gültigkeit unter der Annahme, daß Höheninformationen, die in einer Geländedatenbank höher abgebildet sind als in der Realität, für die Sicherheit einer Mission unkritisch sind. Dennoch gilt es bei diesem Verfahren, sich so wenig wie möglich von der realen Geländestruktur zu entfernen (vgl. Abschnitt 4.2).

Zur Modifikation des X-Band Geländemodells wurden vier Pufferungsmethoden angewendet. Zuerst wurde ein pauschaler Puffer auf das Höhenmodell gelegt. Der Datensatz wurde dabei an allen Stellen um denselben Wert erhöht. Zusätzlich wurden partielle Pufferungen auf der Basis der Steigungsanalyse, der Oberflächenbedeckung sowie der Reflektionsintensität vorgenommen. Im Gegensatz zur pauschalen Pufferung wurde in diesem Zusammenhang versucht, nach der Analyse von definierten Kategorien der einzelnen Einflußfaktoren das Geländemodell zu modifizieren. Ziel dieses Verfahrens war es, die Höhendaten nur um den Betrag zu erhöhen, der benötigt wird, die angestrebte Genauigkeit zu erreichen (vgl. Abschnitt 4.2).

Es zeigte sich, daß bei einer Betrachtung der gesamten Untersuchungsgebiete alle Pufferungsmethoden die angestrebte Genauigkeit problemlos bereitstellen konnten. Betrachtet man jedoch einzelne Abschnitte eines Untersuchungsgebietes, zeigt sich, daß nicht mit jedem Pufferungsverfahren an jeder Stelle die angestrebte Genauigkeit hergestellt werden kann. Insbesondere bei zunehmender Differenz zwischen pauschalem und partiellem Puffer zeigt sich, daß das mit einem globalen „Safety Buffer“ belegte Höhenmodell Defizite aufweist. Besonders kritisch ist dieser Zustand, wenn der pauschale Puffer geringer ist als der partielle (Abschnitt 5.3.3.1).

Da bei den 30 m X-Band Höhendaten im Untersuchungsgebiet Michelstadt die maximale Differenz zwischen allen Pufferungsarten kleiner als 3,00 m und somit kleiner als die erlaubte Genauigkeit (90%) von 3,00 war, stellte hier die Wahl der Pufferungsmethode einen weniger kritischen Faktor dar. Dennoch konnte bei einer weitergehenden Betrachtung des Untersuchungsgebietes festgestellt werden, daß zwar alle partiellen Pufferungsmethoden besser abschnitten als die pauschale Modifikation, jedoch der Puffer basierend auf der Analyse der Oberflächenbedeckung unter den vorgefundenen Bedingungen die besten Ergebnisse liefern konnte. Mit anderen Worten wiegt in einem Untersuchungsgebiet mit ausgeprägter Vegetation und mäßigen Steigungen der Einflußfaktor einer signifikanten Bodenbedeckung am stärksten (vgl. Abschnitt 5.2.3.2).

Für das Untersuchungsgebiet bei Pfronten konnte ein deutlicher Einfluß der Geländesteigung nachgewiesen werden. Bei der Quantifizierung dieses Einflußfaktors war im Gegensatz zum Untersuchungsgebiet Michelstadt die „magere“ Vegetation von Vorteil. Während in Tallagen (0-10°) die Genauigkeit (90%) 2,25 m betrug, konnte für diesen Qualitätsparameter in markanten Steigungsbereichen (>70°) ein Wert von 29,00 m ermittelt werden. Für die übrigen Klassen war mit zunehmender Steigung eine kontinuierliche Zunahme der Ungenauigkeit in der beschriebenen Spanne festzustellen (vgl. Abschnitt 5.2.4.2).

Betrachtet man in diesem Kontext, daß die Genauigkeit (90%) für das Gesamtgebiet bei 5,50 m liegt, wird deutlich, daß ein globaler Puffer nicht die gewünschte Verbesserung der Datensätze erzielen kann, ohne diesen so großzügig anzulegen, daß die Charakteristik des Geländes stark verfälscht werden würde.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die X-Band Höhendaten nicht das Potential besitzen, ohne Modifikation als Datengrundlage für Operationen im Flughafennahbereich bzw. bei bodennahen Flugmanövern Anwendung zu finden. Durch die Addition eines „Safety Buffers“ konnte schließlich die geforderte Genauigkeit (90%) erreicht werden. Bei der Auswahl der Pufferungsart muß allerdings die Geländecharakteristik berücksichtigt werden. Für ebene bis wellige Regionen, durchaus auch mit ausgeprägter Bodenbedeckung, würde ein pauschaler Puffer die Ergebnisse liefern, die zur Einhaltung der angestrebten Genauigkeit benötigt werden. Ausschlaggebend hierfür ist die geringe Differenz zwischen dem globalen und dem partiellen Puffer. Um mögliche Unsicherheiten ausschließen zu können, zeigte sich die partielle Pufferung basierend auf der Analyse der Oberflächenbedeckung als das sicherste Verfahren. Der Einfluß der Geländesteigung ist für derartig ausgeprägte Regionen zu vernachlässigen, da die Oberflächenbedeckung diesen Faktor übersteigt. Letztlich gilt es abzuwägen, ob der deutlich höhere Arbeits- und Kostenaufwand den Nutzen der partiellen Pufferung rechtfertigen würde. Andererseits könnte der pauschale Puffer geringfügig höher ausgelegt werden, auch wenn damit eine Steigerung der mittleren Abweichung und somit eine etwas stärkere Verfälschung der Geländecharakteristik einhergehen würde. Alternativ zu der Pufferung unter Berücksichtigung der Oberflächenbedeckung könnte eine Modifizierung basierend auf den Radarechointensitäten erfolgen. Dieses Verfahren lieferte in der Untersuchung weniger gute Ergebnisse als die Betrachtung der Oberflächenbedeckung, jedoch bessere Werte als die Anwendung eines pauschalen „Safety Buffers“.

Werden wie im alpinen Untersuchungsgebiet, große Geländesteigungen vorgefunden, so ist die Anwendung eines globalen Puffers nicht ausreichend. Somit muß auf eine partielle

Pufferung unter Berücksichtigung der Steigungsgegebenheiten zurückgegriffen werden. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen jedoch, daß bis zu einer Geländesteigung von ca. 40° der Einfluß der Oberflächenbedeckung stärker wiegt, wenn eine signifikante Vegetation vorgefunden wird und somit ein entsprechender Puffer dem der Steigungsanalyse vorgezogen werden sollte. Erst ab Geländeneigungen >40° übersteigt der Einfluß der Steigung den der Oberflächenbedeckung.

6.1.4 Bewertung der SRTM C-Band Höhenmodelle

Wie bereits das 30 m SRTM X-Band Höhenmodell lag der 90 m SRTM C-Band Datensatz für die Untersuchungsgebiete bei Michelstadt und Pfronten vor. Die Verifizierung der Höheninformationen ergab, daß für die Region bei Michelstadt die angestrebte Genauigkeit (90%) von 3,00 m nach der Kontrollpunktanalyse (9,50 m) wie auch der Referenzmodellanalyse (11,50 m) nicht erreicht werden konnte.

Für den Geländeabschnitt bei Pfronten konnte die anvisierte Genauigkeit (90%) von 3,00 m ebensowenig eingehalten werden. Die Genauigkeit (90%) betrug hier nach der Kontrollpunktanalyse 24,00 m und nach dem Referenzmodellvergleich 6,30 m. Die deutliche Diskrepanz zwischen den Verifizierungsverfahren ist durch die selektive Auswahl der Kontrollpunkte zu erklären, die primär auf den Bergen gewonnenen wurden (vgl. Abschnitt 5.2.1.3). Somit wird deutlich, daß für die Kontrollpunktanalyse per se ein deutlich schlechteres Ergebnis zu erwarten war.

Bei einer differenzierten Betrachtung der Geländesteigung sowie der Oberflächenbedeckung konnte auch hier bis auf die Regionen im alpinen Untersuchungsgebiet mit sehr niedrigen Steigungen sowie für die Klasse Verkehrsflächen die für den Flughafennahbereich angestrebte Genauigkeit (90%) von 3,00 m nicht erreicht werden.

Diese Tatsache, wie auch die Erkenntnis, daß für die 90 m C-Band Daten selbst bei den differenzierten Betrachtungen stets eine niedrigere mittlere Abweichung festgestellt werden konnte als für die 30 m X-Band Höhenmodelle, ist dadurch zu erklären, daß die C-Band Datensätze durch die Interpolation der Höhenwerte eines 30 m Modells entstanden sind (vgl. Abschnitt 4.3.1). Somit konnten stark abweichende Werte eliminiert werden, was sich schließlich in der niedrigeren mittleren Abweichung widerspiegelt. Die Genauigkeit (90%) für Bereiche mit einer ausgeprägten Oberflächenbedeckung bzw. starken Gefällewechseln liegt unter der des 30 m Höhenmodells. Hier kann der dreifach größere Stützstellenabstand der C-Band Daten nicht die Kontur mit der notwendigen Genauigkeit wiedergeben. Dies hat zur Folge, daß auch für das Untersuchungsgebiet bei Michelstadt eine partielle Pufferung notwendig ist, da die Differenz zwischen pauschalem Puffer und partiellem Puffer deutlich größer ist als die erlaubte Genauigkeit (90%) von 3,00 m. (vgl. Abschnitt 5.3.3.2).

Letztlich muß auch für die SRTM C-Band Daten festgestellt werden, daß die Höheninformationen nicht ohne eine korrigierende Maßnahme für sicherheitskritische Operationen in der Luftfahrt, insbesondere im Flughafennahbereich, geeignet sind.

Es konnte gezeigt werden, daß die Addition eines „Safety Buffers“ eine Modifikation dahingehend ermöglicht, die Höheninformationen schließlich auch für kritische Bereiche verwendbar zu machen. Anders als bei den 30 m X-Band Geländedaten spielt allerdings schon im welligen Gelände die Geländeneigung eine größere Rolle als die Oberflächenbedeckung. Grund hierfür ist der große Stützstellenabstand, der nur eine gröbere Darstellung der Topographie erlaubt. Für weitläufige und eher flache Geländeabschnitte bleibt die Oberflächenbedeckung der dominierende Einflußfaktor. In solchen Bereichen findet aufgrund der Herstellungsweise eine deutliche Elimination dieses Fehlers statt, da der abgebildete Höhenwert aus neun Werten interpoliert wurde.

6.2 Bewertung der Verfahrensweise

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konnte gezeigt werden, daß mit dem vorgestellten Verfahren eine Modifikation von Höheninformationen dahingehend möglich ist, daß die Datensätze auch für Missionstypen einsetzbar sind, ohne daß das Originalgeländemodell die hierfür geforderten Eigenschaften aufweist. Um die allgemeine Anwendbarkeit des Verfahrens darzulegen und zu überprüfen, wurden Datensätze unterschiedlicher Genauigkeit und Auflösung betrachtet. Das Modifikationsverfahren hat allerdings nur unter der Einschränkung Gültigkeit, daß Höhenwerte, die in der Geländedatenbank höher abgebildet sind als in der Realität, für das Erreichen des Missionsziels unkritisch sind. Demnach ist es für Flugmanöver nur eingeschränkt geeignet, bei denen eine gewisse Höhe über dem Gelände nicht überflogen werden soll. Ein entsprechendes Missionsszenario ist beispielsweise das Unterfliegen von Radarerfassungssystemen. Soll hingegen ausschließlich eine Kollision mit dem Gelände vermieden werden, stellt das Verfahren eine Alternative zu kostenintensiven Generierungsmethoden hochgenauer Geländemodelle dar. Auch für Gebiete, bei denen lediglich eine Datengewinnung mit aus dem Weltraum operierenden Systemen möglich ist, kann eine derartige Methode Anwendung finden.

Wie beschrieben, können mit dem angewendeten Verfahren Höheninformationen zum einen mit einem pauschalen Puffer belegt werden. Zum anderen werden Geländemodelle mit einer Vielzahl von partiellen Puffern modifiziert, die innerhalb eines Datensatzes eine bestimmte Kategorisierung berücksichtigen. Unabhängig von der räumlichen Auflösung der Höhendaten funktionierte die pauschale Pufferung, bei der ein bestimmter Wert auf alle Höhenwerte addiert wurde, zuverlässig. Die angestrebten Genauigkeiten konnten für alle Höhenmodelle problemlos erreicht werden. Die Verifizierung der modifizierten Datensätze wies lediglich einen Prozessierungsfehler auf, der vernachlässigbar ist. Die maximale Abweichung zu dem erwarteten Ergebnis betrug 0,62 cm und wurde bei der pauschalen Pufferung des C-Band Höhenmodells im Untersuchungsgebiet Michelstadt erreicht.

Da aber die pauschale Pufferung bei der Untersuchung ausgewählter Abschnitte teilweise erhebliche Defizite hinsichtlich des Erreichens der angestrebten Genauigkeit aufwies, ist eine partielle Pufferung der Höhendaten je nach Charakteristik des Geländes bzw. des Datensatzes unumgänglich. Prinzipiell erfüllte auch dieses Verfahren die angestrebte Verbesserung, doch mit einer Zunahme des Stützstellenabstandes des zu modifizierenden Höhenmodells stieg der Prozessierungsfehler. Als Grund hierfür konnte das Verhältnis zwischen der räumlichen Auflösung eines digitalen Geländemodells (Stützstellenabstand) und der Detailtreue der zu extrahierenden Kategorie festgestellt werden (vgl. Abschnitt 5.3.3). Stehen diese beiden Datensätze in einem ungünstigen Verhältnis hinsichtlich der räumlichen Auflösung, kann es zu einem signifikanten Informationsverlust kommen, der sich in der Prozessierung bis hin zum endgültig modifizierten Höhenmodell durchsetzt. Das kann letztlich dazu führen, daß die angestrebte Genauigkeit nicht mehr gewährleistet werden kann, obwohl dies die Methodik des Pufferungsverfahrens prinzipiell zuließe. Der festgestellten Problematik könnte entgegengewirkt werden, indem man das Höhenmodell und den als Schablone zur Kategorisierung verwendeten Datensatz in ihrer Detailliertheit anpaßt. Dies ist zum einen dadurch möglich, daß man die Kategorisierung mit einer geringeren räumlichen Auflösung durchführt, so daß die einzelnen Klassen mit dem Stützstellenabstand der Höhendaten abbildbar sind. Dies bedeutet jedoch ebenfalls einen Informationsverlust, der insbesondere in Regionen mit Oberflächenklassen geringer Ausdehnung, z.B. bergiges Gelände mit häufigen Steigungswechseln, auftreten würde. Insbesondere in solchen Regionen stellt die Detailtreue der Kategorien einen unverzichtbaren Informationsgehalt zur Wahrung der Sicherheit dar.

Eine andere Möglichkeit, den Prozessierungsfehlern entgegenzuwirken, wäre den Stützstellenabstand eines Geländemodells für die Analyse und Pufferung der Daten so zu verringern, daß alle Informationen lückenlos gewahrt bleiben. Durch die Verringerung des

Stützstellenabstandes würde der Datensatz selbst nicht an Genauigkeit gewinnen, allerdings würde der Zerteilungsprozeß deutlich weniger Lücken verursachen. Wird nach der partiellen Pufferung der Datensatz schließlich wieder zusammengefügt, kann er wiederum unter der Anwendung eines Maximalwertfilters in das ursprüngliche Format umgewandelt werden, ohne daß ein Verlust an Sicherheit eintreten würde. Nachteilig an diesem Verfahren ist jedoch, daß mit einer Verringerung des Stützstellenabstandes eine Zunahme des Datenvolumens einhergeht. Dies kann sich unter Umständen sehr nachteilig auf die Rechenzeit der Analyse und Pufferung der Höhendaten auswirken. Inwieweit eine Berücksichtigung dieser Faktoren tatsächlich den Prozessierungsfehler zu minimieren vermag, wurde im Rahmen der Untersuchung nicht analysiert.

Des weiteren konnte bei der Modifikation der Höhendaten bestimmt werden, daß mit einer Steigerung der Genauigkeit bei einem bestimmten Konfidenzintervall, in dieser Untersuchung 90%, eine Vergrößerung der mittleren Abweichung festgestellt werden kann. Da die mittlere Abweichung einen Indikator dafür darstellt, inwieweit das modifizierte Geländemodell von der Referenz abweicht, gilt es bei jeder Anwendung zu überprüfen, ob dieser Faktor von so großer Notwendigkeit ist, daß Defizite bei der Genauigkeit (90%) hinnehmbar sind. Sollte dies der Fall sein, empfiehlt es sich, den Puffer so gering wie unbedingt notwendig auszulegen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß das in der Untersuchung vorgestellte Verfahren zur Modifikation von Höhendaten zur Erlangung einer angestrebten Genauigkeit gute Ergebnisse liefert. Das Verfahren bietet die Möglichkeit, Höhendaten verschiedenster Auflösung und Genauigkeit durch die Addition einer angepaßten Sicherheitsmarge auch für Luftfahrtanwendungen nutzbar zu machen, für die sie prinzipiell nicht geeignet sind. Somit stellt das Verfahren eine Alternative zur Generierung von hochgenauen aber kostenintensiven Geländedaten da. Vermag man den Prozessierungsfehler bei der Analyse und Modifikation der Daten zu minimieren, kann praktisch jede Geländedatenbank an die notwendigen Genauigkeiten angepaßt werden. Es sollte allerdings berücksichtigt werden, daß das Verfahren nur für den Fall Gültigkeit besitzt, daß Höheninformationen, die in der Datenbank höher als die Realität abgespeichert sind, keine Gefährdung der Mission darstellen.

Ebenfalls gilt es bei der Bewertung der Resultate zu berücksichtigen, daß die dargestellten Ergebnisse in zwei räumlich stark begrenzten und von der Charakteristik sehr unterschiedlichen Gebieten gewonnen wurden. Inwieweit die ermittelten Werte, insbesondere die der potentiellen „Safety Buffer“, auf andere Gebiete übertragbar sind, konnte aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von entsprechenden Datensätzen in der vorliegenden Untersuchung nicht ermittelt werden. Um einen beispielsweise einen Katalog mit sinnvollen Puffern zu erstellen, die auf die verschiedenen Geländemodelle unter entsprechenden Randbedingungen zu addieren sind, ohne im Vorfeld eine hinreichende Analyse durchführen zu müssen, wäre es notwendig, die ermittelten Ergebnisse sowie das vorgestellte Verfahren in einer weiterführenden Untersuchung zu verifizieren. Eine Absicherung der Ergebnisse würde dann erfolgen, wenn in verschiedenen Bereichen mit identischen Gegebenheiten dieselben Ergebnisse bestätigt werden könnten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der Luftfahrt besteht ein stetig steigender Bedarf an digitalen Höheninformationen hoher Genauigkeit und Integrität. Indes bleibt die Frage offen, inwieweit existierende Datenquellen den hohen Anforderungen der Luftfahrt gerecht werden können. Davon ausgehend war es Ziel der vorliegenden Arbeit, ein Verfahren zur Analyse, Bewertung und Modifikation von Höheninformationen zu entwickeln, welches es erlaubt, die besonderen Randbedingungen von Luftfahrtanwendungen zu berücksichtigen. Mit dieser Absicht wurden Geländedatensätze, basierend auf Radar- und Lasertechnologien eingehend untersucht, wobei die von der DLR und NASA erstellten SRTM X- und C-Band Höhenmodelle mit einer nahezu globalen Abdeckung im Zentrum des Interesses standen. Die genannten Techniken bedienen sich aktiver Sensoren, wobei über die Laufzeitmessung der ausgesandten Strahlung (Mikrowellen bzw. Licht) die Entfernung des zu vermessenden Objektes ermittelt werden kann. Da jedoch die Strahlung in Oberflächen einzudringen vermag, stellt das aufgenommene Höhenmodell lediglich ein Abbild der Reflektionshöhen dar. Es können demnach keine eindeutigen Informationen hinsichtlich des wirklichen Bodens wie auch der Geländeoberflächen samt seiner Bedeckung bereitgestellt werden. Wurden die SRTM-Datensätze bereits vielfach hinsichtlich einer Abbildung des nackten Bodens (Geländemodell) untersucht, so bleibt bislang eine Analyse hinsichtlich der Darstellung der Erdoberfläche samt seiner Bedeckung (Oberflächenmodell), welches für die Luftfahrt von besonderem Interesse ist, aus.

Aus diesem Grund wurden die X- und C-Band SRTM Radarhöhendaten wie auch zwei Laserhöhenmodelle des HVBG mit Referenzdaten verglichen, welche die Erdoberfläche samt ihrer Bedeckung wiedergeben. Dabei galt es zu überprüfen, inwieweit die Höhenmodelle den durch die RTCA/EUROCAE und ICAO definierten Datenanforderungen für kritische Flugphasen genügen. Ein sicherheitskritisches Szenario wird beispielsweise durch den unmittelbaren An- und Abflugbereich eines Flughafens beschrieben. Für den sicheren Betrieb eines Luftfahrzeuges wird von den oben genannten Institutionen eine Genauigkeit der Geländedatenbank von 3 m bei einem Konfidenzintervall von 90% gefordert. Das bedeutet, daß lediglich 10% aller in einer Geländedatenbank gespeicherten Höhenwerte um mehr als 3,00 m von den tatsächlichen Höhen abweichen dürfen.

Um eine exakte Verifikation durchführen zu können, wurden die zu untersuchenden Datensätze zum einen mit Kontrollpunkten aber auch kompletten Referenzhöhenmodellen verglichen. Hierzu wurden zwei Untersuchungsgebiete bestimmt. Das erste Untersuchungsgebiet liegt bei Michelstadt im Odenwald und weist die Charakteristika eines Mittelgebirges auf. Bewaldung und landwirtschaftliche Nutzung bei hügeligem Gelände herrschen vor. Das zweite Untersuchungsgebiet wird durch einen alpinen Geländeabschnitt bei Pfronten im Ostallgäu repräsentiert. Dieser Geländeabschnitt ist durch eine eher lockere Vegetation bei zum Teil sehr starken Geländeneigungen geprägt.

Nach einer Verifikation der Datensätze zeigte sich, daß die Radarhöhendaten unter keinen Umständen den angestrebten Anforderungen genügen konnten. Das X-Band Höhenmodell mit einem Rasterabstand von 30 m wies zwar im Gegensatz zu dem 90 m C-Band Modell ein besseres Ergebnis hinsichtlich der Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% auf, wobei die mittlere Abweichung des C-Band Modells niedriger war. Diese doch überraschende Tatsache ist darauf zurückzuführen, daß das 90m Höhenmodell aus einem ursprünglichen 30 m Datensatz über die Interpolation der Höhenwerte erstellt wurde. Somit kam es zu einer Glättung der zufälligen Fehler, was sich im Mittelwert der Abweichungen niederschlägt. Die Laserhöhenmodelle hingegen lieferten nutzbare Ergebnisse, wobei die Prozessierung und Filterung der Daten für die Bereitstellung geeigneter Höheninformationen eine besondere Rolle spielte.

Um schließlich bewerten zu können, inwieweit die Oberflächeneigenschaften die Qualität der Höhenmodelle beeinflussen, wurden die Geländedaten unter der Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen untersucht. Bei den durchgeführten Analysen der Einflußfaktoren wurde ein besonderes Augenmerk auf die Oberflächenbedeckung, die Geländesteigung wie auch die Reflektionseigenschaften gelegt.

Für die Laserhöhenmodelle zeigte sich auch nach der detaillierten Verifikation, daß die LIDAR-Sensorik zuverlässig arbeitet, sofern die aufgenommene Oberfläche keine nennenswerten Lücken, wie beispielsweise bei einem unbelaubten Wald, aufweist. Somit erscheint die Addition einer Sicherheitsmarge für Laserhöhendaten keine nutzbringende Option darzustellen. Vielmehr ist es notwendig, über die Berücksichtigung des Vegetationsstandes während der Datengenerierung sowie einer geeigneten Filterung der gewonnenen Höhendaten die angestrebte Genauigkeit herzustellen.

Auch nach der partiellen Analyse der Radar Höhenmodelle zeigte sich, daß die SRTM Daten unter keinen Gegebenheiten für den Einsatz in der Luftfahrt geeignet sind. Um dennoch den angestrebten Anforderungen gerecht zu werden, bedurfte es einer Modifikation der Höheninformationen beider Radarsensoren in Form eines „Safety Buffers“. Dieses Verfahren basiert auf der Annahme, daß Höhenwerte, die in einer Geländedatenbank im Vergleich zur Realität zu hoch abgebildet sind, für die Sicherheit einer Flugmission unkritisch sind. Demnach ist es möglich, über die Berechnung der kumulierten relativen Häufigkeit die tatsächliche Genauigkeit bei einem Konfidenzintervall von 90% zu ermitteln. Schließlich kann die ermittelte Abweichung als Sicherheitsmarge auf die Höhenwerte addiert werden. Die Pufferung kann dabei zum einen pauschal für das gesamte Höhenmodell erfolgen, d.h. derselbe Wert wird auf alle Höhenwerte gelegt. Zum anderen können die Abweichungen unter verschiedenen Randbedingungen (partielle Pufferung) berücksichtigt werden. In der Untersuchung erfolgte eine Modifikation der Daten zum einem pauschal, zum anderen wurden die ermittelten Abweichungen der einzelnen Kategorien der Oberflächenbedeckung, Geländesteigung und Reflektionsintensität aufaddiert.

Eine erneute Verifikation der modifizierten Datensätze ergab, daß eine Pufferung der Daten ein Erreichen der angestrebten Genauigkeit und somit eine Nutzung der Daten für sicherheitskritische Luftfahrtanwendungen ermöglicht. Allerdings zeigte sich für das pauschal gepufferte Höhenmodell, daß die angestrebte Genauigkeit zwar erreicht werden konnte, aber nur, wenn das gesamte abgebildete Gebiet betrachtet wird. Legt man das Augenmerk auf Bereiche, in denen die Abweichungen größer sind als für das Gesamtmodell, kann es zu Ungenauigkeiten kommen, die sich als sicherheitskritisch erweisen. Somit wird deutlich, daß ein gesamtes Geländemodell zwar den definierten Qualitätsanforderungen genügen kann, aber bei einer Betrachtung einzelner Geländeabschnitte die Anforderungen deutlich verfehlt werden. Typische Regionen, bei denen solche Defizite auftreten sind Bereiche mit signifikanter Vegetation (Bewaldung) oder auch starken Geländeneigungen.

Um solche Unzulänglichkeiten zu vermeiden, bietet sich die Verwendung eines partiellen Puffers an, der die besonderen Eigenschaften einzelner Geländeabschnitte berücksichtigt, sofern ein pauschaler Puffer nicht so ausgeprägt gewählt werden soll, daß die Charakteristik des wirklichen Geländes sehr stark verfälscht wird. Diese Methode ist zwar erheblich aufwendiger als die Verwendung eines pauschalen Puffers, jedoch wird auf diese Weise der tatsächliche und nicht die mittlere Abweichung eliminiert.

Für alle drei partiellen Puffer (Oberflächen-, Steigungs- und Intensitätsanalyse) können nutzbare Ergebnisse erzielt werden. Dennoch zeigt es sich, daß abhängig von den topographischen Gegebenheiten die entsprechende Pufferungsart gewählt werden sollte. Während in Regionen mit mäßiger Steigung und einer ausgeprägten Vegetation (Mittelgebirge) der Einfluß der Oberflächenbedeckung vorherrscht und den maßgeblichen Einflußfaktor darstellt, sollte in alpinen Regionen mit starken Geländeneigungen und dünnem Bewuchs die Ergebnisse der Steigungsanalyse zur Modifikation der Daten herangezogen

werden. Auf diese Weise kann eine Sicherstellung der angestrebten Genauigkeit erreicht werden, während die Charakteristik des Geländes nur moderat verändert wird. Sollten beide Korrekturinformationen nicht zur Verfügung stehen, kann man sich alternativ der Ergebnisse der Analyse der Reflektionsintensität bedienen. Dieses Verfahren bietet zwar nicht die Genauigkeit der anderen Pufferungsmethoden, weist aber in der Untersuchung bessere Ergebnisse auf als der pauschale Puffer.

Als problematisch bei dem Verfahren zur partiellen Pufferung erwies sich das Zerlegen und Zusammensetzen der Geländemodelle, sofern die Detailtreue der zu bearbeitenden Kategorie durch den Stützstellenabstand der Höhenmodelle nicht genau abzubilden war. Hier kam es zu Prozessierungsfehlern, die das Erreichen der angestrebten Genauigkeiten zum Teil nicht zuließen. Dieses Phänomen trat primär bei den C-Band Höhendaten mit dem größeren Stützstellenabstand auf. Um diese potentiellen Ungenauigkeiten zu vermeiden, ist es für die zukünftige Anwendung dieses Pufferungsprozesses unbedingt notwendig, beide Faktoren aneinander anzupassen.

Im Rahmen dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, daß es möglich ist, existierende Geländemodelle an die von der Luftfahrt geforderten Genauigkeiten anzupassen, ohne daß der ursprüngliche Datensatz das Potential für solche Anwendungen anbietet. Die in der Untersuchung ermittelten Fehlergrößen haben allerdings nur Gültigkeit für die hier betrachteten, räumlich doch sehr begrenzten Untersuchungsgebiete. Um allgemeingültige „Safety Buffer“ für das entwickelte Modifikationsverfahren bereitstellen zu können, wäre eine Verifizierung der erhobenen Ergebnisse notwendig.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die vorgestellten Methoden zur Analyse, Bewertung und Modifikation von digitalen Höheninformationen ein Verfahren darstellen, welches eine kostengünstige Alternative zu lokalen Vermessungsmethoden wie z.B. Laserscanning ist. Somit könnte dieses Verfahren für der ICAO angehörigen Staaten von Interesse sein, die verpflichtet sind, die Verfügbarkeit von Höhendaten für den unmittelbaren An- und Abflugbereich eines Flughafens (Area 2) bis zum 18. November 2010 sicherzustellen, aber weder über die Infrastruktur, noch die Finanzmittel verfügen, derartige Informationen zu erheben.

Quellenverzeichnis

- [Acs07] ACSS: "T²CAS – Product description" Stand 25.04.2007
http://www.acssonboard.com/media/brochures/t2cas_description.pdf
- [AFB07] Amt für Flugsicherung der Bundeswehr, „Militärisches Luftfahrthandbuch Deutschland“, Bundeswehr Air Traffic Services Office, Frankfurt, 2007
- [Alb01] Albertz, J.: „Einführung in die Fernerkundung“, 2. Überarbeitete und ergänzte Auflage, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, pp. 58-66, 2001
- [Ann01] Annoni, A., et al.: „Map Projections for Europe“, European Commission (EUR 20120)
- [Ash93] Ashkenazi, V.: „Coordinate Systems and Datums“, Sixth Seminar on the Global Positioning System, Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, University of Nottingham, England 1993
- [BDV91] Bundesministerium der Verteidigung, „Bundeswehr Heute – Search and Rescue / Der Such- und Rettungsdienst der Bundeswehr“, Bundesministerium der Verteidigung, 1992
- [BOE06] Boeing Commercial Airplanes "Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959 -2005", Aviation Safety Boeing Commercial Airplanes, Seattle-Washington U.S.A, 2006
- [Bre06] Brenner, C.: "Aerial Laser Scanning", International Summer School - Digital Recording and 3D Modeling, Aghios Nikolaos, Crete, Greece, 24-29 April 2006
- [BVV07] BVV: „Geländemodelle – DGM5“ Stand 15.05.2007
<http://www.geodaten.bayern.de>
- [Cam96] Campbell, J.B.: „Introduction to Remote Sensing“, 2nd Edition, The Guilford Press, New York, 1996.
- [Den06] Denker, H.: „Das Europäische Schwere- und Geoidprojekt (EGGP) der Internationalen Assoziation für Geodäsie“, Zeitschrift für Vermessungswesen, 2006
- [DLR07] DLR: „Shuttle Radar Topography Mission X-SAR / SRTM; Die Erde in 3D - 3D View on Earth“, Stand 08.05.2007
<http://www.dlr.de/srtm/>
- [DLR99] DLR: "X-SAR/SRTM – Shuttle Radar Topography Mission / Mapping the Earth from Space", Publikation DLR, 1999
- [EAD07] EADS-Military Air Systems, „Automatischer Tiefflug“,
http://www.eads.com/1024/de/businet/defence/mas/technologies/aircraft_systems
Stand 18.09.2007
- [EC07] European Commission - DG Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability "SRTM-Void Distribution", Stand 2007
<http://srtm.jrc.it/voiddistri2.html>
- [EHK07] Eilmus, B., Heidemeyer, G., Klingauf, U.: "Analysis of terrain data based on satellite imagery for aviation purposes", Proceedings Spie Europe Konferenz, Remote Sensing, Florenz 2007
- [Esr04] ESRI ArcGIS, „Getting Started with ArcGIS“, Software Dokumentation, Redlands/USA 2004
- [Esr05] Esri Inc.: „ArcInfo Software Documentation / ArcDoc 9.1“, Redlands/Kalifornien 2005
- [FAA02] Federal Aviation Administration: "Technical Standard Order, TSO-C151a-Terrain Awareness and Warning System“, Technical report, Federal Aviation Administration, Aircraft Certification Service, Washington DC, 2002

- [FAS07] FAS (Federation of American Scientists) "Digital Elevation Data [DTED]" <http://www.fas.org/irp/program/core/dted.htm>, Stand 19.06.2007
- [FLI98] Flugbetriebs und Informationszentrale (FLIZ), „Militärischer Flugbetrieb in Deutschland“, Abteilung Flugbetrieb in der Bundeswehr, Köln, 1998
- [FLY07] Homepage EU Forschungsprojekt Flysafe: „State of the Art on Terrain Functions“, Stand 24.04.2007
<http://www.eu-flysafe.org/Project/Aviation-Hazards/Terrain/current-systems.html>
- [FSF02] Flight Safety Foundation: „Data Show Final Approach and Landing Remain Riskiest Phase of Flight“, in Flight Safety Digest, December 2002
- [FSF96] Flight Safety Foundation: „An Analysis of Controlled-flight-into-terrain Accidents of Commercial Operators, 1988 through 1994“, in Flight Safety Digest, April-May, 1996.
- [FSF99] Flight Safety Foundation: „Killers in Aviation: FSF Task Force Presents Facts About Approach-and-landing and Controlled-flight-into-terrain Accidents“, Flight Safety Digest, November–December, 1998, January-February, 1999.
- [FSL01] Friedrich A., Schiefele J., Launer M.: „Generierung und Evaluierung von Gelände und Flughafendatenbanken mittels Methoden der Fernerkundung. Abschlußbericht Teil II“. FG Flugsysteme und Regelungstechnik TU Darmstadt 2001
- [GIS07] GISWIKI: „Geoid“ Stand 29.05.2007
<http://www.giswiki.org/wiki/Geoid>
- [Gru98] Gruber, F.J.: „Formelsammlung für das Vermessungswesen“, Dümmler Verlag, Bonn, 1998
- [Hec94] Heckbert, P. "Graphic Gems IV", AP Professional, Boston/USA 1994
- [Hee75] Heer, O.: "Flugsicherung – Einführung in die Grundlagen", Springer Verlag, Berlin, 1975
- [HEK05] Heide Meyer, G., Eilmus, B., Klingauf, U.: „Qualitätsmanagement von Geländedaten für sicherheitskritische Anwendungen in der Luftfahrt“, Proceedings DGLR Jahrestagung, Friedrichshafen 2005
- [Herr75] Herr, O.: "Flugsicherung – Einführung in die Grundlagen" Springer Verlag, Berlin, 1975
- [HFB05] Hall, O., Falorni, G., Bras, R.: „Characterization and Quantification of Data Voids in the Shuttle Topography Mission Data“, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 2, No. 2, 2005
- [HG94] Hake, G., Grünreich, D.: „Kartographie“, de Gruyter, Berlin, 7. neubearbeitete Auflage, 1994.
- [HK06] Heide Meyer, G., Kingauf, U.: "Integrity Enhancement of Terrain Data for Safety Critical Aviation Applications", Proceedings ICRAT Conference, Belgrad 2006:
- [Hon07] Honeywell Aerospace: "Enhanced Ground Proximity Warning System (EGPWS)" Stand 24.04.2007
<http://www.honeywell.com/sites/aero/Egpws-Home.htm>
- [HVB05] HVBG: Persönliche Auskunft Herr Carsten Dorn
- [HVB06] HVBG: Persönliche Auskunft Dr. Robert Strauß
- [HVB07] HVBG: „Digitales Geländemodell (DGM)“ Stand 15.05.2007
<http://www.hvbg.hessen.de>
- [ICA01] International Civil Aviation Organization (ICAO): "International Standards and recommended Practices: Annex 4. Aeronautical Charts", 2001
- [ICA04] International Civil Aviation Organization (ICAO): "Aeronautical Information Services", Annex 15, Twelfth Edition, 2004

- [ICA07] International Civil Aviation Organization (ICAO) „Homepage - International Civil Aviation Organization“, Stand 20.07.2007
<http://www.icao.int/>
- [ICA93] International Civil Aviation Organization (ICAO): “Aircraft Operations”, Procedures for Air Navigation Services, Volume I, Fourth Edition, 1993
- [ICA97] International Civil Aviation Organization (ICAO): “World Geodatic System – 1984 (WGS84) Manual“, Doc 9674, 1. Auflage, 1997
- [ICA98] International Civil Aviation Organization (ICAO): “Air Traffic Services”, Annex 11, Twelfth Edition, 1998
- [ICA99] International Civil Aviation Organization (ICAO): “Aerodromes”, Annex 14, Third Edition, 1999
- [IER08] Homepage des IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), Stand 19.05.2008
<http://www.iers.org/>
- [Inf05] Infoterra: „LIDAR – Precision Airborne Surveying“, Produkt Spezifikation, Infoterra Ltd, 2005 (www.infoterra-global.com)
- [ISO05] International Organization for Standardsation (ISO) / Deutsches Institut für Normung e.V.: „Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2005)“, 2005
- [Jep07] Jeppesen Commercial Aviation : “Airline Operations Center-Chart Services“
http://www.jeppesen.com/download/ca/CHRT_SERV.pdf
- [Juk04] Jukes M.: Aircraft Display Systems. Aerospace Series. Professional Engineering Publishing Limited, London and Bury St Edmunds, UK, 2004.
- [Kah97] Kahmen, H.: „Vermessungskunde“, 19. Auflage, de Gruyter, Berlin, 1997.
- [KHL02] Koch, A., Heipke, C., Lohmann, P.: „Bewertung von SRTM Digitalen Geländemodellen - Methodik und Ergebnisse“, Publikationen der DGPF Band 11, 2002
- [Koc02] Koch, A.: „Qualitätsuntersuchung und Validierung von SRTM DTED-2 Daten in Niedersachsen“ Schlußbericht des Instituts für Photogrammetrie und Geoinformation der Universität Hannover, 2002
- [KPB04] Kramer, L.J., Prinzel III, L.J., Bailey, R.E., Arthur III, J.J., and Parish, R.V.: ”Flight Test Evaluation of Synthetic Vision – Concepts at a Terrain Challenged Airport” Technical report, Langley Research Center, Hampton, Virginia/USA 2004.
- [KR99] Khatwa R. and Roelen A. L. C.: “An Analysis of Controlled-flight-into-terrain (CFIT) Accidents of Commercial Operators, 1988 Trough 1994.” Flight Safety Digest, Volume 17/18(No. 11-12/1-2):166–212, November / Dezember / Januar / Februar 1998/1999.
- [Kra96] Kraus, K.: „Photogrammetrie, Band 2, Verfeinerte Methoden und Anwendungen“, Dümmler Verlag, Bonn, 1996.
- [KS88] Kraus, K., Schneider W.: „Fernerkundung. Band 1, Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken“. Dümmler Verlag, Bonn 1988
- [KW94] Kraus, K., Waldhäusl, P.: „Photogrammetrie, Band 1, Grundlagen und Standardverfahren“, Dümmler Verlag, Bonn, 1994.
- [Leic99] Leica Geosystems AG: „GPS - Basics Introduction to GPS“, Version 1.0, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz, 1999
- [LK87] Lillesand, T. M., Kiefer, R. W.: „Remote Sensing and Image Interpretation“, 2. Ausg. New York, NY: John Wiley & Sons, 1987

- [Loh07] Lohmann, P.: „Laserscanning Introduction - Ausgewählte Kapitel aus der Fernerkundung“, Skript zur Vorlesung, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Universität Hannover, Stand 27.06.2007
<http://www.ipi.uni-hannover.de>
- [Luf07] Lufthansa Systems: „Flight Navigation Services“, Stand 27.04.2007
http://www.lhsystems.de/topic3/topic33/33_4.htm
- [May01] May, L.: „Generierung und Verifikation von Geländedatenbanken für Luftfahrzeuge“, Dissertation Technische Universität Darmstadt, FG Flugmechanik und Regelungstechnik, Shaker Verlag, 2001.
- [Men00] Mensen H.: „Betriebsausrüstung von Luftfahrzeugen“, Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung Technische Universität Darmstadt, Institut für Flugmechanik und Regelungstechnik 1999/2000.
- [Mor05] Morsdorf, F.: „Fernerkundung III“ Vorlesungsunterlagen, Fachbereich Geographie, Universität Zürich 2005
- [NAS03] NASA, „SRTM Documentation“, Stand 05.11.2003,
ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/Documentation/SRTM_Topo.txt
- [NAS06] NASA, „Earth Observatory-Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)“, Stand 14. September 2006,
http://earthobservatory.nasa.gov/Library/GRACE_Revised/page3.html
- [NAS07] NASA: „Shuttle Radar Topography Mission“, Stand 09.05.2007
http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/factsheet_tech.pdf
- [Nat07] NATO Standardization Agreement „Glossary of Terms and Definitions AAP-06“, Stand 07.09.2007
<http://www.nato.int/docu/stanag/aap006/aap6.htm>
- [NAT07] NATO Standardization Agency (NSA), „NATO Glossary of Terms and Definitions (AAP-6)“
<http://www.nato.int/docu/stanag/aap006/aap6.htm>, Stand 18.09.2006
- [NGA00] National Geospatial-Intelligence Agency: „Performance Specification Digital Elevation Data (DTED)“, MIL-PRF-89020B, 2000
<http://www.nga.mil/ast/fm/acq/89020B.pdf> (Stand 18.06.2007)
- [Pal04] Paluch, N., „Anwendung von Co-Design für verteilte Echtzeitsysteme. Einführung und Ausblicke am Beispiel des Tiefflugsystems TMLLF an Bord des Airbus A400M.“, Diplomarbeit an der Fakultät für Informatik und Automatisierung; Institut für Theoretische und Technische Informatik; Fachgebiet System- und Steuerungstheorie, TU Ilmenau, 2004
- [Pau05] Paul, A.: „Qualitätsuntersuchung und Verifizierung von SRTM-Geländedaten hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in der Luftfahrt“, Diplomarbeit, Fachbereich Geowissenschaften/Geographie, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt 2005
- [Pur00] Purpus, M.: „Die Rolle der Prädiktion in dreidimensionalen Flugführungsdarstellungen“ Dissertation Technische Universität Darmstadt, FG Flugmechanik und Regelungstechnik, Shaker Verlag, 2000.
- [RT02] Reich, M., Thiel, K.H.: „Vergleich von Digitalen Höhenmodellen“, 2002 Publikationen der DGPF Band 11, 2002
- [RTC01] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA): „User Requirements for Aerodrome Mapping Information“, DO-272, RTCA, 2001
- [RTC02] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA): „User Requirements for Terrain and Obstacles Data“, DO-276, RTCA, 2002
- [RTC04] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA): „Interchange Standards for Terrain, Obstacle and Aerodrome Mapping Data“, DO-291, RTCA, 2004

- [RTC05a] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA): „User Requirements for Terrain and Obstacle Data“, DO-276A, RTCA, 2005.
- [RTC05b] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA): „User Requirements for Aerodrome Mapping Information“, DO-272A, RTCA, 2002.
- [RTC98] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA): „Standards for Processing Aeronautical Data“, DO-200A, RTCA, 1998
- [SAE97] Society of Automotive Engineers (SAE): „Human Interface Criteria for Vertical Situation Awareness Displays“, ARP5430, SAE, 2001
- [San98] Santitamnont, P.: „Interferometric SAR Processing for Topographic Mapping“. Dissertation Fachrichtung Vermessungswesen, Universität. Hannover. (Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover; Nr. 230) Hannover 1998
- [Soc00] Socet Set, Version 4.3 „Users Manual“, Bae Systems, 2000
- [Swi07] Swissphoto Group: „Airborne Laser Scanning“, Technologien, Stand 14.05.2007, <http://www.swissphoto.ch>
- [USG07] USGS: „Produktübersicht“ Stand 10.05.2007
<http://eros.usgs.gov/products/elevation.html>
- [Voß04] Voß, W.: „Taschenbuch der Statistik“, 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [Wal06] Waldinger, P.: „Flugverkehrsmanagement und Flugsicherung“, Skript zur Vorlesung Flugsicherung, Technische Universität Darmstadt, WS 2006/2007
- [Wei83] Weinmann, G.: „Geometrische Grundlagen der Luftbildinterpretation“, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1983
- [Wie06] Wiesemann, T.: „Konzeption und Entwicklung eines adaptiven Geländemodells zur progressiven Übertragung und Darstellung von Geländedaten in 3D-Flugführungsanzeigen“ Dissertation Technische Universität Darmstadt, FG Flugmechanik und Regelungstechnik, Shaker Verlag, 2006.
- [Wik06] Wikipedia, „Delaunay-Triangulation“, <http://de.wikipedia.org/wiki/Delaunay-Triangulation>, Stand 30. September 2006
- [Wip05] Wipplinger P.: „Untersuchung des Pilotenverhaltens bei HALS/DTOP-Anflügen“, Dissertation Technische Universität Darmstadt, FG Flugsysteme und Regelungstechnik, Shaker Verlag, 2005
- [YKB06] Yastikli N., Kocak G., Buyuksalih G.: „Accuracy And Morphological Analyses of GTOPO30 and SRTM X -C Band DEMs in the Test Area Istanbul“, ISPRS Workshop, Ankara 2006

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1.1: Flugphasen eines Fluges im kontrollierten Luftraum [nach Wal06] | 3 |
| Abbildung 1.2: Unfälle nach Flugphasen 1996 bis 2005 [Boe06] | 4 |
| Abbildung 1.3: Charakteristische Flugphasen einer SAR Mission | 6 |
| Abbildung 2.1: Beispiel eines digitalen Höhenmodells [RTC05a] | 9 |
| Abbildung 2.2: Darstellungsformen von Digitalen Höhenmodellen | 10 |
| Abbildung 2.3: Digitale Geländemodelle | 10 |
| Abbildung 2.4: Datenlücken und Störungen in SRTM X-Band Geländedaten | 11 |
| Abbildung 2.5: Geometrie einer Senkrechtaufnahme [Cam96]) | 13 |
| Abbildung 2.6: Reliefverschiebung und Differentialentzerrung von Luftbildern | 13 |
| Abbildung 2.7: Berechnung der Höhe eines Objektes aus der Stereoparallaxe [Cam96] | 14 |
| Abbildung 2.8: Stereobildflüge [LK87] | 15 |
| Abbildung 2.9: Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten [KW94] | 17 |
| Abbildung 2.10: Optimale Verteilung von Paßpunkten [FSL01] | 18 |
| Abbildung 2.11: Transmissionsgrad der Atmosphäre für Mikrowellen [KS88] | 21 |
| Abbildung 2.12: Schematische Darstellung der Eindringtiefen von Mikrowellen [Alb01] | 22 |
| Abbildung 2.13: Reflexion von Mikrowellen an Oberflächen [Pau05] (nach Albertz) | 23 |
| Abbildung 2.14: Depressionswinkel und Radarschatten [Alb01] | 23 |
| Abbildung 2.15: Polarisierung von Mikrowellen [KS88] | 24 |
| Abbildung 2.16: Schematische Darstellung einer Radaraufnahme [Alb01] | 24 |
| Abbildung 2.17: Geometrie des Radarprinzips [Kal03] | 25 |
| Abbildung 2.18: SAR- Wirkungsweise [Alb01] | 26 |
| Abbildung 2.19: Interferometrisches Prinzip [Hei04] | 27 |
| Abbildung 2.20: Erste und letzte Reflexion von Laserscannern | 29 |
| Abbildung 2.21: 3D-Punktwolke mit erster und letzter Reflexion | 29 |
| Abbildung 2.22: Darstellungsweisen von regulären Gittern [May01] | 31 |
| Abbildung 2.23: Auswirkung des Stützstellenabstands auf Raster-Höhendaten | 32 |
| Abbildung 2.24: Beispiel eines regulären Gittermodells als ASCII-Datei | 32 |
| Abbildung 2.25: Beispiel eines irregulären Gitters (TIN) | 33 |
| Abbildung 2.26: Triangulierung nach Delaunay | 34 |
| Abbildung 2.27: Vergleich Raster- und Höhenlinienmodell | 35 |
| Abbildung 2.28: Lokales und geozentrisches Datum [Esr04] | 36 |
| Abbildung 2.29: Datum und Kartenprojektion [Ann01] | 37 |
| Abbildung 2.30: Schweremodell der Erde [Nas06] | 38 |
| Abbildung 2.31: Beziehung zwischen Ellipsoid und Geoid [May01] | 38 |
| Abbildung 3.1: Abdeckungsgebiete der RTCA/DO-276A [nach RTC05a] | 41 |
| Abbildung 3.2: Abhängigkeit von Genauigkeit und Stützstellenabstand | 49 |
| Abbildung 3.3: Darstellung eines Geländewarnsystems (TAWS) [FLY07] | 50 |
| Abbildung 3.4: Funktionsweise des T ² CAS Geländewarnmoduls CPA [Acs07] | 51 |
| Abbildung 3.5: SVS mit GCAS - Ground Collision Avoidance System (TUD) | 53 |
| Abbildung 3.6: Systemkonzept von SVS Anzeigen [MAY01] | 54 |
| Abbildung 3.7: Ausschnitt aus einer Jeppesen Approach Chart (Sion) | 54 |
| Abbildung 3.8: Generierung aeronautischer Karten | 55 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 4.1: Prinzip des „Safety Buffers“ | 61 |
| Abbildung 4.2: Netzartige Abdeckung der SAR-X Daten [DLR07] | 64 |
| Abbildung 4.3: Darstellung des interferometrischen SRTM Radars [DLR99]..... | 64 |
| Abbildung 4.4: LIDAR ASCII Protokoll | 66 |
| Abbildung 4.5: Überblick über das zentrale Untersuchungsgebiet Michelstadt/Odenwald | 69 |
| Abbildung 4.6: DGM Untersuchungsgebiet Pfronten mit Breitenberg und Aggenstein | 70 |
| Abbildung 4.7: Geländedatenverifizierung mit Hilfe von Kontrollpunkten | 71 |
| Abbildung 4.8: Geländedatenverifizierung mit Hilfe von Referenzmodellen | 71 |
| Abbildung 4.9: Zerlegung eines Differenzmodells | 72 |
| Abbildung 4.10: Beispiel eines Rasterdatensatzes sowie der dazugehörigen Steigungskarte . | 73 |
| Abbildung 4.11: Klassifizierung der Oberflächenbedeckung eines Geländemodells..... | 74 |
| Abbildung 4.12: Vergleich Luftbild - Intensitätenbild..... | 76 |
| Abbildung 5.1: Lage der Kontrollpunkte im Referenzgebiet Michelstadt..... | 80 |
| Abbildung 5.2: Kontrollpunkt-Referenzmodellvergleich Michelstadt | 81 |
| Abbildung 5.3: Vermessung von Kontrollpunkten am Aggenstein bei Pfronten | 82 |
| Abbildung 5.4: Verteilung der Kontrollpunkte im Untersuchungsgebiet Pfronten | 83 |
| Abbildung 5.5: Fehlerverteilung Referenzmodellanalyse Laserscanning Daten (2000) | 89 |
| Abbildung 5.6: Fehlerverteilung Referenzmodellanalyse SRTM X-Band Daten..... | 90 |
| Abbildung 5.7: Fehlerverteilung Referenzmodellanalyse SRTM C-Band Daten..... | 91 |
| Abbildung 5.8: Verhältnis von Wald zu Nichtwald in den Untersuchungsgebieten | 92 |
| Abbildung 5.9: Fehlerverteilung der ersten Laser Reflektionen | 93 |
| Abbildung 5.10: Topographische Elemente im Untersuchungsgebiet Michelstadt..... | 96 |
| Abbildung 5.11: Differenzhöhenmodell ohne bewaldete Gebiete | 106 |
| Abbildung 5.12: Fehlervergleich original / pauschal gepufferte X-Band Daten | 110 |
| Abbildung 5.13: Fehlervergleich partiell / pauschal gepufferte X-Band Daten | 112 |
| Abbildung 5.14: Ungünstiges Verhältnis untersuchte Kategorie/Stützstellenabstand..... | 119 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 2.1: Definitionsgenauigkeit natürlicher Objekte [KW94]..... | 18 |
| Tabelle 2.2: Frequenzbereiche der Radartechnologie [Alb01] | 22 |
| Tabelle 2.3: DTED Level [NGA00][FAS07]..... | 33 |
| Tabelle 2.4: Genauigkeiten und Bezugssysteme DTED 0 - 2 [NGA00] | 33 |
| Tabelle 3.1: Geländedaten Attribute [RTC05a] | 42 |
| Tabelle 3.2: Anforderungen an digitale Geländedaten: Area 1 [RTC05a] | 45 |
| Tabelle 3.3: Anforderungen an digitale Geländedaten: Area 2 [RTC05a] | 45 |
| Tabelle 3.4: Anforderungen an digitale Geländedaten: Area 3 [RTC05a] | 46 |
| Tabelle 3.5: Anforderungen an digitale Geländedaten: AMDB Area [RTC05a] | 46 |
| Tabelle 3.6: Anforderungen an digitale Geländedaten, ICAO Area 1-4 [ICA04] | 48 |
| Tabelle 4.1: Eigenschaften des SRTM Höhenmodelle [DLR99][USG07] | 65 |
| Tabelle 4.2: Eigenschaften der LIDAR Höhenmodelle | 67 |
| Tabelle 4.3: Eigenschaften der DGM5 Höhenmodelle | 68 |
| Tabelle 4.4: Spezifikation des SRTM X-SAR GTC Radar Image [DLR07] | 76 |
| Tabelle 5.1: Analyse Kontrollpunkt-Referenzmodellvergleich Michelstadt | 81 |
| Tabelle 5.2: Analyse Kontrollpunkt-DGM5 Höhenmodell/Pfronten..... | 83 |
| Tabelle 5.3: Analyse Kontrollpunkt-DGM5 Höhenmodell/Michelstadt..... | 84 |
| Tabelle 5.4: Analyse Kontrollpunkt-Laser HLVA/Odenwald | 85 |
| Tabelle 5.5: Analyse Kontrollpunkt - SRTM X-Band Geländemodell..... | 86 |
| Tabelle 5.6: Analyse Kontrollpunkt-SRTM C-Band Geländemodell..... | 87 |
| Tabelle 5.7: Referenzmodellanalyse Bereich Michelstadt/Odenwald (DOM) | 88 |
| Tabelle 5.8: Referenzmodellanalyse DGM5 / Laser DHM 2004..... | 92 |
| Tabelle 5.9: Referenzmodellanalyse Pfronten/Ostallgäu | 94 |
| Tabelle 5.10: Auflistung und Codierung der topographischen Elemente | 96 |
| Tabelle 5.11: DHM Analyse -Einfluß der Oberflächenbedeckung..... | 97 |
| Tabelle 5.12: Laser DHM Analyse -Einfluß der Oberflächenbedeckung..... | 100 |
| Tabelle 5.13: SRTM DHM Analyse unter Berücksichtigung der Geländeneigung..... | 102 |
| Tabelle 5.14: Qualitätsparameter in Abhängigkeit des Radarechos | 104 |
| Tabelle 5.15: Radarechointensitäten in verschiedenen Oberflächenklassen..... | 105 |
| Tabelle 5.16: Qualitätsparameter in Abhängigkeit der Laser-Reflektionsintensitäten | 107 |
| Tabelle 5.17: Übersicht der Qualitätsparameter der Radar Höhenmodelle | 109 |
| Tabelle 5.18: Verifikation der global gepufferten Geländemodelle | 109 |
| Tabelle 5.19: „Safety Buffer“ basierend auf der topographischen Analyse | 111 |
| Tabelle 5.20: Verifikation der partiellen Pufferung X-Band (topographische Analyse) | 112 |
| Tabelle 5.21: Vergleich topographische/globale Pufferung X-Band (ausgesuchte Klassen) | 113 |
| Tabelle 5.22: Verifikation der partiellen Pufferung C-Band (topographische Analyse) | 114 |
| Tabelle 5.23: Vergleich topographische/globale Pufferung C-Band (ausgesuchte Klassen)..... | 115 |
| Tabelle 5.24: „Safety Buffer“ der partiellen Pufferung (Steigungsanalyse)..... | 116 |
| Tabelle 5.25: Verifikation partielle Pufferung X-Band Odenwald (Steigungsanalyse)..... | 116 |
| Tabelle 5.26: Pufferung X-Band nach Steigungsanalyse (ausgewählte Gebiete)..... | 117 |
| Tabelle 5.27: Verifikation partielle Pufferung X-Band Ostallgäu (Steigungsanalyse)..... | 117 |
| Tabelle 5.28: Vergleich Pufferung X-Band Ostallgäu (ausgewählte Steigungsklassen)..... | 118 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 5.29: Verifikation partielle Pufferung C-Band Odenwald (Steigungsanalyse)..... | 120 |
| Tabelle 5.30: Pufferung C-Band nach Steigungsanalyse (ausgewählte Gebiete) | 120 |
| Tabelle 5.31: Vergleich Pufferung C-Band Odenwald (ausgewählte Steigungsklassen) | 120 |
| Tabelle 5.32: Verifikation partielle Pufferung C-Band Ostallgäu (Steigungsanalyse)..... | 121 |
| Tabelle 5.33: Vergleich Pufferung C-Band Ostallgäu (ausgewählte Steigungsklassen) | 122 |
| Tabelle 5.34: „Safety Buffer“ der partiellen Pufferung (Reflektionsintensität)..... | 123 |
| Tabelle 5.35: Verifikation partielle Pufferung X-Band (Reflektionsintensitätsanalyse) | 123 |
| Tabelle 5.36: Vergleich Pufferung X-Band Odenwald (ausgewählte Reflektionsklassen) ... | 124 |
| Tabelle 5.37: Pufferung Reflektionsintensitätsanalyse X-Band (ausgewählte Gebiete)..... | 124 |

Lebenslauf

Gunther HEIDELMEYER

geboren am 01. September 1971

in Rüsselsheim

Familienstand verheiratet, ein Kind

Schule

| | |
|-------------|--|
| 1977 – 1981 | Grundschule, Hattersheim |
| 1981 – 1987 | Leibniz-Gymnasium, Frankfurt/Main |
| 1987 – 1990 | Friedrich-Dessauer-Gymnasium, Frankfurt/Main |
| 1990 | Allgemeine Hochschulreife |

Studium

| | |
|-------------|---|
| 1990-1991 | Studium der Klassischen Archäologie, J.W. Goethe-Universität, Frankfurt/Main |
| 1991 – 2002 | Studium des Bauingenieurwesens, Technische Universität Darmstadt |

Berufserfahrung

| | |
|-------------|---|
| 2003 – 2008 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fachgebiet Flugsysteme und Regelungstechnik, Fachbereich Maschinenbau Technische Universität Darmstadt |
|-------------|---|

Ausgewählte Veröffentlichungen

| | |
|------|--|
| 2006 | Heidelmeyer, G. u. Klingauf, U.: „ <i>Impact of the surface characteristics on the quality of INSAR elevation data</i> “, Proceedings SPIE-Remote Sensing Conference, Stockholm 2006 |
| 2006 | Heidelmeyer, G. u. Klingauf, U.: „ <i>Integrity Enhancement of Terrain Data for Safety Critical Aviation Applications</i> “, Proceedings ICRAT Conference, Belgrad 2006 |
| 2007 | Heidelmeyer, G., Eilmus, B., Klingauf, U.: „ <i>Correlation between Lidar and radar reflex intensity and the accuracy of the associated elevation information</i> “, Proceedings SPIE Defense & Security Symposium, Orlando/Florida 2007 |